

**ANTHONY PEREVALO WENDLER**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO  
ENRIQUECIDO COM CALDA DE CIMENTO PARA FACE DE BARRAGENS DE  
CONCRETO**

**CURITIBA  
2010**

**ANTHONY PEREVALO WENDLER**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO  
ENRIQUECIDO COM CALDA DE CIMENTO PARA FACE DE BARRAGENS DE  
CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho

**CURITIBA**

**2010**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

ANTHONY PEREVALO WENDLER

### **ESTUDO EXPERIMENTAL DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO ENRIQUECIDO COM CALDA DE CIMENTO PARA FACE DE BARRAGENS DE CONCRETO**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho  
Programa de Pós-graduação em Construção Civil, UFPR

Examinadores: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Laila Valduga Artigas  
Programa de Pós-graduação em Construção Civil, UFPR

Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon  
Departamento de Recursos Hídricos, UNICAMP

Curitiba, 7 de maio de 2010

*À minha esposa Adriane*

*À minha filha Rafaella*

*Maiores amores da minha vida*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, aos meus pais Jules e Maria que me ensinaram os valores da vida e sempre me incentivaram para alcançar meus objetivos, e ao meu irmão Edison pelo companheirismo de tantos anos.

À minha esposa e minha filha pela paciência e compreensão por vários períodos ausente de seu convívio, em prol da realização de um sonho pessoal.

Ao Prof. José Marques por convidar-me para o desenvolvimento deste trabalho, sempre participativo nas etapas decisórias, e pela amizade de tantos anos, depositando em mim tanta confiança.

À J. Maluceli, que permitiu o desenvolvimento da pesquisa na UHE Mauá, disponibilizando todos os recursos necessários, em especial ao Eng. Joaquim Franco, pelas facilidades logísticas, e ao Eng. Luciano, pela coordenação dos trabalhos de campo.

À Tecdan, pela participação no preparo e aplicação das caldas, ao técnico Jacinto, e ao Eng. Rheno, pela disponibilidade dos dados de controle da obra.

À equipe do LACTEC, aos profissionais, Jéferson pela coordenação dos ensaios de laboratório em Curitiba, e Jorge pela extração dos testemunhos no campo, e ao Eng. Plínio, pelos esclarecimentos iniciais.

À equipe da COPEL na obra, pela receptividade e colaboração, em especial aos Engenheiros Rafael e Jose Augusto e ao técnico Wilian, e ao Eng. Osvaldo, cujo companheirismo foi decisivo para realização da pesquisa, na coordenação dos acontecimentos e acolhida durante minha estada na obra.

Ao programa de pós-graduação, que sempre disponibilizou todas as orientações necessárias através da Ziza, aos professores pelo conhecimento transmitido, em especial ao Prof. Kleber F. Portela, e aos colegas, Maurício, César Daher, e demais, pelo incentivo e momentos de aprendizado.

## RESUMO

Dentre as considerações no projeto de barragens de concreto, tem-se o controle de percolação de água pelo maciço. No Brasil, comumente é adotada a solução por zoneamento da barragem, empregando-se material diferenciado na face, com menor permeabilidade, em geral o concreto convencional. Objetivando a produtividade na construção de barragens, a pesquisa procurou testar uma técnica bastante difundida na China, o enriquecimento com calda do CCR, em que é aplicada uma quantidade de calda de cimento calculada para atender as especificações de projeto. Procurou-se avaliar as propriedades físicas do CCR enriquecido com calda, em substituição ao concreto convencional usualmente empregado, utilizando os mesmos materiais, central de concreto, mão de obra e equipamentos, empregados na construção da Usina Hidrelétrica Mauá. O programa experimental compreendeu a confecção de prismas experimentais de campo, com dimensões a fim de simular uma porção da face da barragem, e posterior extração de testemunhos, os quais foram submetidos a ensaios mecânicos e de permeabilidade. Cada prisma foi executado com uma combinação de fatores da calda, variando-se a relação água/cimento e a quantidade de calda por metro linear, e execução de um prisma em concreto convencional para referência. Os resultados mostraram que para relações água/cimento 0,74, o material resultante atendeu às especificações de projeto, com permeabilidade compatível com o CCV de referência, além de consumos de cimento notadamente menores (25 a 15%).

**Palavras-chave:** barragens, concreto compactado com rolo (CCR), enriquecimento com calda, permeabilidade.

## ABSTRACT

Among the considerations in design of concrete dams, it has seepage control through massive. In Brazil, the solution is commonly adopted for zoning of the dam, using different material on the face, with lower permeability, in general the conventional concrete. Aiming productivity in dam construction, the study sought to test a very popular technique in China, the grout enrichment of RCC, which is applied in a quantity of cement-water grout calculated to meet the design specifications. We sought to evaluate the physical properties of the grout enriched RCC, replacing the conventional concrete usually employed, using the same materials, concrete core, labor and equipment used in construction of Maua Power Plant. The experimental program included the construction of site test fills (prisms), with dimensions to simulate a portion of face of the dam, and subsequent extraction of drilled cores, which were subjected to mechanical tests and permeability. Each prism was performed with a combination of factors of the grout, varying the water/cement ratio and the amount of grout per meter, and implementation of a prism in conventional concrete for reference. The results showed that for water/cement ratio 0.74, the resulting material met the design specifications with permeability compatible with the reference conventional concrete and cement consumption markedly lower (25-15%).

**Keywords:** dams, roller compacted concrete (RCC), grout enrichment, permeability.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	14
LISTA DE SIGLAS .....	15
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1. OBJETIVOS.....	19
1.1.1. Geral .....	19
1.1.2. Específicos.....	19
1.2. HIPÓTESES .....	20
1.3. JUSTIFICATIVAS .....	20
1.3.1. Tecnológica.....	20
1.3.2. Econômica .....	20
1.3.3. Ambiental .....	21
1.3.4. Social .....	21
1.4. MÉTODO DE PESQUISA.....	22
1.5. LIMITAÇÕES .....	22
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	22
<b>2. CCR APLICADO EM BARRAGENS .....</b>	<b>24</b>
2.1. HISTÓRICO.....	24
2.2. CONCEITO.....	30
2.3. CONSIDERAÇÕES DE PROJETO .....	31
2.3.1. Controle de Percolação.....	32
2.3.2. Variações Volumétricas de Origem Térmica .....	33
2.4. DOSAGEM .....	34
2.4.1. Considerações Gerais.....	34
2.4.2. Considerações sobre a Granulometria.....	35
2.4.3. Misturas Típicas .....	38
2.5. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CCR .....	39
2.5.1. Massa Unitária e <i>Cannon Time</i> Através do Aparelho de Vebê .....	39
2.5.2. Massa Unitária e Teor de Água Unitária Através do Aparelho DMA .....	41
2.5.3. Densidade, Umidade e Água Unitária com o Densímetro Nuclear.....	42
2.5.4. Permeabilidade do Concreto Fresco.....	44
2.5.5. Propriedades do CCR Endurecido .....	45



<b>3. ASPECTOS DA EXECUÇÃO DO CCR .....</b>	<b>47</b>
3.1. PROCESSO CONSTRUTIVO .....	47
3.1.1. Fabricação .....	47
3.1.2. Transporte .....	48
3.1.3. Lançamento .....	49
3.1.4. Compactação .....	51
3.1.5. Cura .....	52
3.1.6. Juntas de Contração .....	53
3.1.7. Execução da Face de Montante.....	54
3.1.8. Demais Interferências .....	56
3.2. CONTROLE DE QUALIDADE .....	57
3.3. INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS - O MÉTODO CHINÊS .....	59
3.3.1. CCR Rampado .....	59
3.3.2. CCR Enriquecido com calda .....	63
<b>4. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>68</b>
4.1. UHE MAUÁ.....	68
4.2. PROJETO DE EXPERIMENTOS .....	70
4.3. EQUIPAMENTOS .....	75
4.3.1. Adensamento do CCR enriquecido.....	75
4.3.2. Extração de testemunhos.....	76
4.4. MATERIAIS E DOSAGENS.....	77
4.4.1. Calda de cimento .....	77
4.4.2. CCR e CCV de face .....	78
4.5. PROCEDIMENTOS .....	79
4.5.1. Moldagem dos prismas experimentais.....	79
4.5.2. Ensaio de campo – Caldas e concretos .....	84
4.5.3. Extração dos testemunhos.....	84
4.5.4. Ensaio mecânico e de permeabilidade .....	87
<b>5. RESULTADOS E ANÁLISE.....</b>	<b>91</b>
5.1. RESULTADOS DAS CALDAS E CONCRETOS.....	91
5.2. RESULTADOS DO CCR ENRIQUECIDO .....	92
5.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	97
5.3.1. Comparação com controle da obra .....	97
5.3.2. Resultados de resistência mecânica.....	99

5.4. RECONSTITUIÇÃO DOS TRAÇOS E ANÁLISE DE CUSTOS.....	100
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>103</b>
6.1. CONCLUSÕES.....	103
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	107
ANEXO A .....	115

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – SEÇÃO TRANSVERSAL ESQUEMÁTICA DE BARRAGENS À GRAVIDADE .....	16
FIGURA 1.2 – DETALHE DA FACE DE MONTANTE DA BARRAGEM MAUÁ.....	17
FIGURA 1.3 – MÉTODO RAMPADO EM VISTA E PERSPECTIVA .....	18
FIGURA 2.1 – SEÇÃO TRANSVERSAL DA ENSECADEIRA DA BARRAGEM DE SHIMEN .....	25
FIGURA 2.2 – BARRAGEM DE WILLOW CREEK .....	26
FIGURA 2.3 – VISTA PANORÂMICA DA BARRAGEM DE MIEL I .....	27
FIGURA 2.4 – BARRAGEM DA DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO .....	28
FIGURA 2.5 – VISTA GERAL DA UHE SALTO CAXIAS .....	29
FIGURA 2.6 – VISTA GERAL DA UHE DONA FRANCISCA .....	29
FIGURA 2.7 – ESQUEMA TÍPICO DA PRAÇA DA BARRAGEM DE SALTO CAXIAS .....	31
FIGURA 2.8 – GALERIA DE DRENAGEM DA BARRAGEM DE CAPANDA .....	32
FIGURA 2.9 – DIFERENCIAL DE TEMPERATURA NO CONCRETO .....	34
FIGURA 2.10 – VOLUMES ABSOLUTOS DOS COMPONENTES DOS CONCRETOS UTILIZADOS NA UHE ITUMBIARA .....	36
FIGURA 2.11 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS UTILIZADAS NA DOSAGEM DO CCR ..	37
FIGURA 2.12 – DETERMINAÇÃO DO <i>CANNON TIME</i> .....	40
FIGURA 2.13 – DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA COMPACTADA .....	41
FIGURA 2.14 – SEQUÊNCIA DO ENSAIO COM DMA .....	42
FIGURA 2.15 – ESQUEMA DE UTILIZAÇÃO DO DENSÍMETRO NUCLEAR .....	43
FIGURA 2.16 – DENSÍMETRO NUCLEAR UTILIZADO NO CONTROLE DA UHE LAJEADO .....	44
FIGURA 2.17 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE EM ANDAMENTO .....	45
FIGURA 2.18 – MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA DE CCR.....	46
FIGURA 3.1 – CENTRAL DE CCR UTILIZADA NA BARRAGEM DE CAPANDA .....	48
FIGURA 3.2 – TRANSPORTE DO CCR NA BARRAGEM DE MIEL I .....	49
FIGURA 3.3 – ESQUEMA DO MÉTODO HORIZONTAL .....	50
FIGURA 3.4 – APLICAÇÃO DE ARGAMASSA DE LIGAÇÃO NA BARRAGEM DE MAUÁ .	50
FIGURA 3.5 – FORMAS UTILIZADAS NAS BARRAGENS DE MIEL I E DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO .....	51
FIGURA 3.6 – CURA COM TRATOR AGRÍCOLA ADAPTADO COM NEBULIZADOR .....	52
FIGURA 3.7 – JUNTA DE CONTRAÇÃO COM MANTA NÃO ADERENTE .....	53
FIGURA 3.8 – CORTE MECÂNICO DA JUNTA COM EQUIPAMENTO VIBRATÓRIO .....	54
FIGURA 3.9 – DETALHE DO PROCESSO DA ÁRVORE DE NATAL.....	55

FIGURA 3.10 – EXECUÇÃO DA FACE DE MONTANTE COM CCV NA BARRAGEM DE MAUÁ .....	55
FIGURA 3.11 – GALERIAS COM ENCHIMENTO COM BRITA EM CAPANDA .....	57
FIGURA 3.12 – DETALHE DO DENSÍMETRO NUCLEAR .....	58
FIGURA 3.13 – PERSPECTIVA DO MÉTODO RAMPADO .....	60
FIGURA 3.14 – EXECUÇÃO DO CCR RAMPADO EM LAJEADO .....	61
FIGURA 3.15 – ESQUEMA DO MÉTODO RAMPADO .....	61
FIGURA 3.16 – COMPARATIVO DE PRODUTIVIDADES E CUSTOS ENTRE MÉTODOS .....	62
FIGURA 3.17 – VISTA DA BARRAGEM DE KINTA EM EXECUÇÃO .....	64
FIGURA 3.18 – APLICAÇÃO DO CCR ENRIQUECIDO EM MAUÁ .....	65
FIGURA 3.19 – ADENSAMENTO DO CCR ENRIQUECIDO NA BARRAGEM DE JIANGYA .....	67
FIGURA 4.1 – ARRANJO GERAL DA UHE MAUÁ .....	69
FIGURA 4.2 – VISTA DA BARRAGEM DE MAUÁ EM CONSTRUÇÃO.....	69
FIGURA 4.3 – COMBINAÇÕES DA CALDA PARA ENRIQUECIMENTO DO CCR - MAUÁ .....	72
FIGURA 4.4 – DETALHE DAS DIMENSÕES DOS PRISMAS .....	73
FIGURA 4.5 – VIBRADOR DE IMERSÃO NR 140.....	76
FIGURA 4.6 – PERFURATRIZ HILTI DD 200 .....	77
FIGURA 4.7 – MOLDAGEM DO CCV DE REFERÊNCIA .....	80
FIGURA 4.8 – COLOCAÇÃO DO CCR NAS FORMAS .....	81
FIGURA 4.9 – DETALHE DO PREPARO DA CALDA.....	82
FIGURA 4.10 – PROCESSO DE ENRIQUECIMENTO DO CCR .....	83
FIGURA 4.11 – CURA DO CCR ENRIQUECIDO .....	83
FIGURA 4.12 – ENSAIO DO CONE DE MARSH.....	84
FIGURA 4.13 – PROCEDIMENTO DE EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS .....	85
FIGURA 4.14 – DETALHE DO ASPECTO DOS PRISMAS APÓS DESFORMA.....	86
FIGURA 4.15 – DETALHE DA IDENTIFICAÇÃO DOS TESTEMUNHOS .....	86
FIGURA 4.16 – VISÃO GERAL DOS TESTEMUNHOS.....	87
FIGURA 4.17 – USINAGEM DOS TESTEMUNHOS.....	87
FIGURA 4.18 – PRENSA UTILIZADA NOS ENSAIOS MECÂNICOS .....	88
FIGURA 4.19 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	88
FIGURA 4.20 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	89
FIGURA 4.21 – ESQUEMA DO EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE PERMEABILIDADE..	89
FIGURA 4.22 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	90
FIGURA 5.1 - PENETRAÇÃO DA CALDA 0,74 MISTURADA A 31°C .....	92
FIGURA 5.2 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	93
FIGURA 5.3 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	94

FIGURA 5.4 – RESULTADOS DE PERMEABILIDADE .....	94
FIGURA 5.5 – COMPARAÇÃO COM CCV DE REFERÊNCIA – COMPRESSÃO .....	96
FIGURA 5.6 – COMPARAÇÃO COM CCV DE REFERÊNCIA – TRAÇÃO.....	96
FIGURA 5.7 – COMPARAÇÃO COM CCV DE REFERÊNCIA - PERMEABILIDADE .....	97
FIGURA 5.8 – COMPARAÇÃO CCV OBRA X CCV ESTUDO.....	98
FIGURA 5.9 – COMPARAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS .....	99
FIGURA 5.10 – CONSUMO DE CIMENTO REAL – CCR ENRIQUECIDO .....	101
FIGURA 5.11 – RESULTADOS DE PERMEABILIDADE X CONSUMO DE CIMENTO.....	102

## LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – RESUMO DOS FATORES ENVOLVIDOS NA PESQUISA .....	71
TABELA 4.2 – RESUMO DOS PRISMAS EXPERIMENTAIS .....	75
TABELA 4.3 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO VIBRADOR DE IMERSÃO NR 140 ...	75
TABELA 4.4 – CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO .....	78
TABELA 4.5 – CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO .....	78
TABELA 4.6 – DOSAGEM DOS CONCRETOS EMPREGADOS.....	79
TABELA 5.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO .....	91
TABELA 5.2 – RESULTADOS DO CCR ENRIQUECIDO .....	93
TABELA 5.3 – COMPARAÇÃO CCR ENRIQUECIDO X CCV DE REFERÊNCIA.....	95
TABELA 5.4 – COMPARAÇÃO CCV OBRA X CCV ESTUDO.....	98
TABELA 5.5 – COMPARAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS.....	99
TABELA 5.6 – RESONSTITUIÇÃO DOS TRAÇOS DE CCR ENRIQUECIDO .....	101

## LISTA DE SIGLAS

ANOVA	Análise de variância
ATF	CCR com alto teor de finos
CCR	Concreto compactado com rolo
CCV	Concreto convencional
COPEL	Companhia paranaense de energia elétrica
DMA	Dispositivo medidor de água
DMC	Dimensão máxima característica
FURNAS	Furnas centrais elétricas S.A.
GERCC	Grout enrichment of RCC
HASLC	Horizontally advancing sloped layers construction
LAME	Laboratório de materiais e estruturas
MU	Massa unitária
RCC	Roller compacted concrete
RCD	Roller compacted dam
UHE	Usina hidrelétrica

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre as preocupações de projeto em barragens de concreto à gravidade, destaca-se o controle de percolação de água, cuja importância está ligada à segurança, no controle de pressões neutras no maciço, e à durabilidade da estrutura, na minimização dos processos deletérios originados pela água do reservatório (RESENDE, 2005).

Para controle de percolações pelo maciço, adotou-se convencionalmente a aplicação de zoneamento da barragem de concreto, considerando uma pequena faixa de concreto com maior resistência, e portanto menos permeável, a montante das estruturas. O controle de pressões neutras fica sob a responsabilidade dessa camada de concreto mais rico aliado a um sistema de drenos estruturado, conforme pode ser visto na Figura 1.1 (PACELLI DE ANDRADE e ANDRIOLO, 1996).

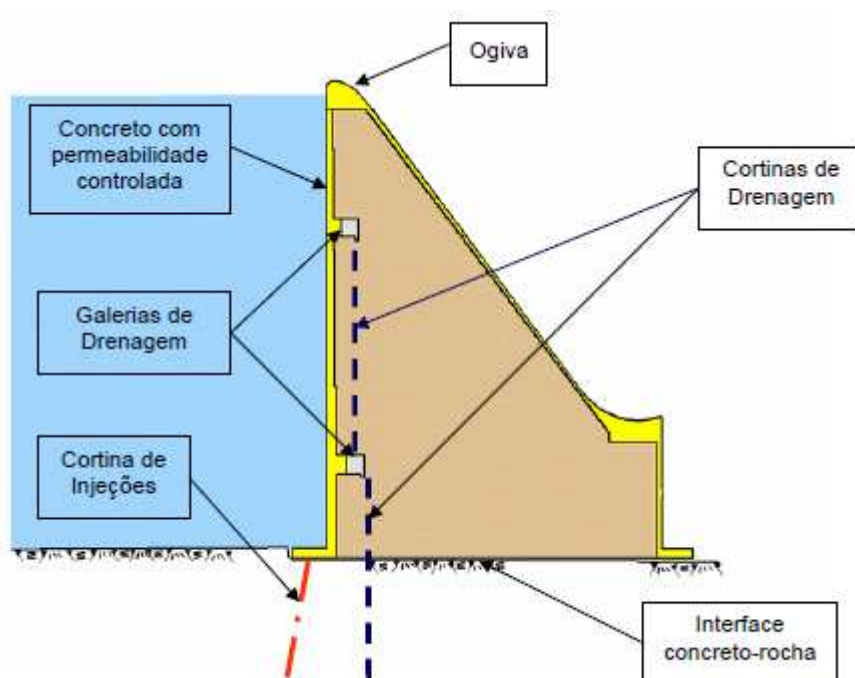


FIGURA 1.1 – SEÇÃO TRANSVERSAL ESQUEMÁTICA DE BARRAGENS À GRAVIDADE (MARQUES FILHO, 2005)

Para garantia de estanqueidade, ao longo dos anos, no mundo foram utilizadas soluções em concreto convencional, pré-moldados de concreto, e mantas poliméricas diversas. Particularmente no Brasil, as soluções utilizando face de montante em concreto convencional (CCV) predominam e tem se mostrado eficazes



sob os pontos de vista construtivos e de desempenho. Dentre os processos, destaca-se o método da “árvore de natal” com a colocação de porções discretas de concreto convencional imediatamente antes do CCR, sendo ambos costurados quando do processo de adensamento (Figura 1.2).

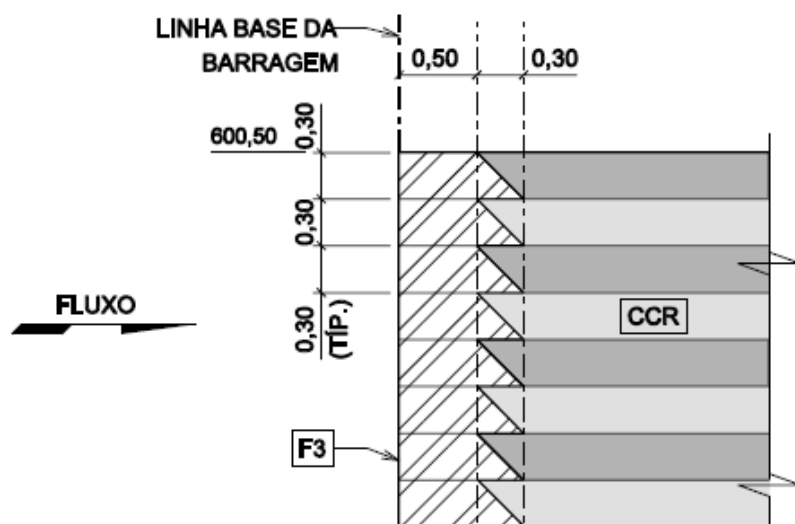


FIGURA 1.2 – DETALHE DA FACE DE MONTANTE DA BARRAGEM MAUÁ

Como o processo de execução do CCR é altamente industrializado e mecanizado, atividades periféricas à concretagem do maciço devem ser analisadas com cuidado, minimizando-se sua interferência na velocidade e automação do processo e garantindo as propriedades especificadas para o material. A execução das faces de montante, a execução de juntas e a colocação de veda juntas, galerias e cortinas de drenagem são atividades que criam dificuldades no processo, podendo gerar caminhos críticos ou gargalos durante a construção.

Para otimização da colocação de CCR, aumentando o uso contínuo da central de mistura e diminuindo as interferências, há aproximadamente dez anos vem sendo utilizado comumente na China o método de colocação rampado com a aplicação de enriquecimento de calda na face de montante.

No método rampado, diminui-se a área de espalhamento e compactação, subindo a barragem entre as juntas, permitindo o lançamento de camadas discretas de pequeno volume constantemente. As camadas são colocadas com pequena inclinação com relação à horizontal de modo a permitir o acesso do rolo, podendo a

superfície ser retomada para a próxima camada em um intervalo de tempo relativamente curto (FORBES, 2003).

O tempo reduzido entre camadas sucessivas pode evitar a necessidade de utilização de argamassa de ligação, reconstituindo as condições básicas de barragens com concreto massa no que se refere às alturas entre camadas, com menor número de juntas frias, e com juntas de contração bem definidas. A Figura 1.3 mostra o método chinês rampado em vista e perspectiva, para melhor entendimento.

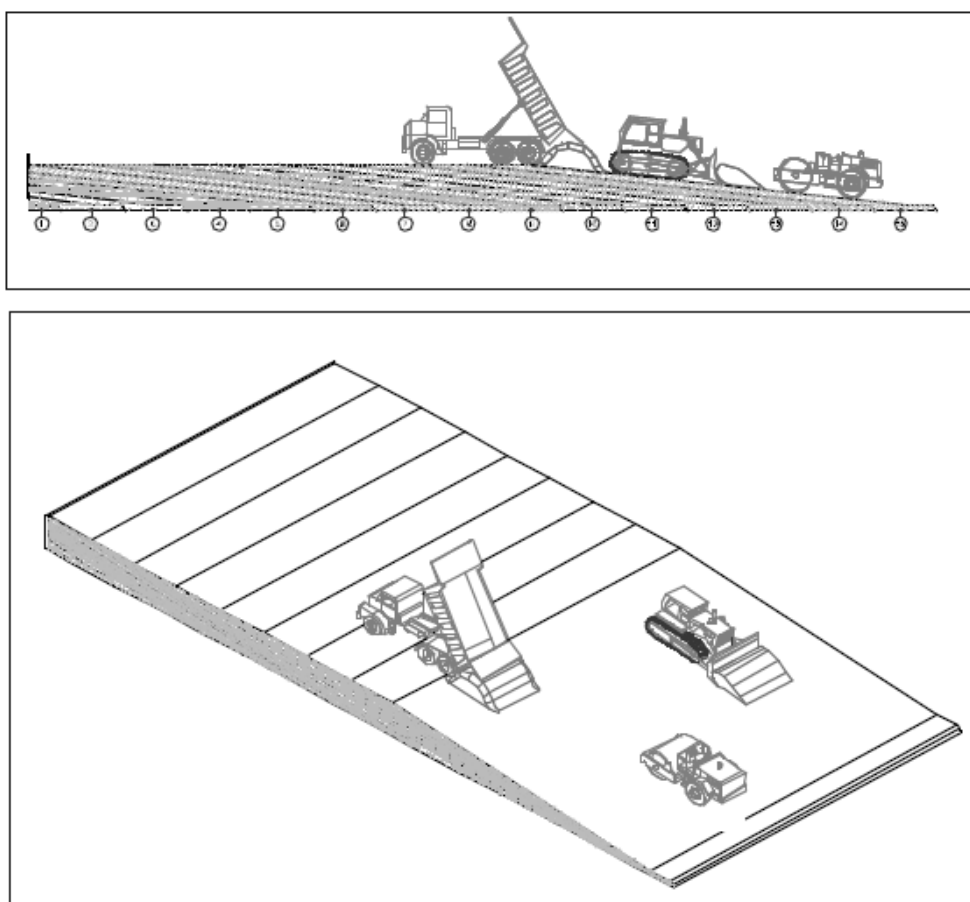


FIGURA 1.3 – MÉTODO RAMPADO EM VISTA E PERSPECTIVA (BATISTA ET AL., 2002 b)

Outra solução desenvolvida na China prevê a aplicação de pasta ou argamassa sobre o CCR e a posterior compactação por vibradores de imersão enriquecendo o concreto com pasta e argamassa. Este processo denominado de enriquecimento do CCR com argamassa, ou *Grout Enrichment of RCC*, tem sido aplicado para melhorar as condições de permeabilidade e de resistência mecânica

das faces de montante ou em regiões onde o acabamento pode ser importante (FORBES, 1999).

Nesta técnica é lançada uma quantidade limitada de calda de cimento junto ao CCR, calculada para garantir a obtenção de um material com alto grau de homogeneidade, espalhado na face de montante, sendo utilizados na seqüência vibradores convencionais para a compactação desta região. O método tem como vantagem a diminuição da interferência na praça e a simplificação decorrente da utilização de um só tipo de mistura na mesma (Ibid).

Apesar de ter sido executado em caráter experimental em FURNAS em maciços experimentais de laboratório, e em parede lateral da galeria de drenagem da UHE Dona Francisca, no Rio Grande do Sul, as tentativas de adaptação do método construtivo com enriquecimento ainda não permitiram a obtenção de banco de dados conclusivo para sua aplicação em larga escala no Brasil.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Geral

Avaliar as propriedades físicas do CCR enriquecido com calda de cimento, em comparação com o concreto convencional aplicado na face de montante de barragens, a partir de prismas experimentais de campo confeccionados na UHE Mauá, no interior do Paraná.

### 1.1.2. Específicos

- Obter correlações dos parâmetros físicos do material (resistência mecânica e permeabilidade) em função da variação da quantidade de calda por metro linear e traço da calda;
- Obter misturas de CCR enriquecido com melhor desempenho que o concreto convencional de face, ou seja, dentro das especificações de projeto e com traços mais econômicos.

## 1.2. HIPÓTESES

- Após o enriquecimento do CCR, o material resultante apresentará o mesmo comportamento do concreto convencional de face quanto às suas propriedades físicas;
- O CCR empregado atualmente na construção de barragens no Brasil, com utilização de material cimentício entre 70 e 80 kg/m<sup>3</sup> e aditivos plastificantes e retardadores de pega, em condições usuais de fundação e carregamento, apresenta um índice de vazios que possibilita a penetração da calda.

## 1.3. JUSTIFICATIVAS

### 1.3.1. Tecnológica

Apesar da recente utilização do CCR enriquecido em testes na UHE Dona Francisca, no Rio Grande do Sul, há necessidade de ampliação do banco de dados para sua aplicação em larga escala, por tratar-se de uma adaptação da técnica originada na China, país com características climáticas diferentes do Brasil e onde se utilizam misturas de CCR com maior teor cimentício, geralmente acima de 150 kg/m<sup>3</sup> (FORBES, 1999).

O CCR consiste em uma técnica baseada no aumento da velocidade de produção através da mecanização e diminuição da incidência de mão de obra por produto unitário, aliada a baixos custos e consumos de cimento (MARQUES FILHO, 2005). No entanto, há necessidade da manutenção da sua competitividade na construção de barragens, através da introdução de inovações tecnológicas crescentes e com o mesmo propósito. Como exemplo pode-se citar o CCR rampado, que dispensa o uso de argamassa de ligação entre camadas devido à redução da praça de trabalho e, conseqüentemente, resulta em maior produtividade (BATISTA et al., 2002).

### 1.3.2. Econômica

A construção de barragens com desempenho e confiabilidade adequados significa uma menor probabilidade de ocorrência de manifestações patológicas,

reduzindo consideravelmente os custos relativos a intervenções, através de reparos ou medidas de reforço.

O emprego do CCR enriquecido, em substituição ao CCV de face, resulta em menores custos globais para o empreendimento, devido à economia com transporte e lançamento do concreto, pois o CCR colocado na face é o mesmo do restante da barragem, consumos menores de material, e aumento da produtividade (FORBES, 2008).

### 1.3.3. Ambiental

A implantação de uma barragem em um determinado local, apesar de todos os estudos, planejamentos, projetos, precauções e medidas mitigadoras tomadas, sempre causam impactos ao meio ambiente que normalmente são calculados e absorvidos pela natureza no decorrer do tempo de sua construção e operação, ou compensado adequadamente com a anuência da sociedade organizada.

Porém, na realização dos estudos dos impactos ambientais não é contemplada a hipótese de ruína da estrutura e caso esta venha a ocorrer os danos ao entorno serão enormes. Segundo IDNR (2003), falhas em barragens têm impacto catastrófico em aglomerados populacionais, propriedades privadas e públicas, localizadas à jusante. Logo, na mitigação do impacto sócio-ambiental, é necessário fornecer à sociedade a certeza de execução de obras com materiais e técnicas adequadas, diminuindo o risco percebido pela comunidade envolvida.

### 1.3.4. Social

A execução de obras públicas com prazo e custos menores reverte em benefícios para a sociedade, pois o montante economizado com a redução do cronograma pode ser reaplicado em outras prioridades sociais relevantes.

Muitas barragens de concreto são construídas em regiões mais pobres do Brasil, por exemplo, no Nordeste, com a finalidade de armazenamento de água em períodos de seca ou mesmo geração de energia, incorrendo em oportunidades de emprego e conforto para a população.

#### 1.4. MÉTODO DE PESQUISA

O método de pesquisa adotado prevê a caracterização do CCR enriquecido considerando-se a variabilidade dos fatores envolvidos e estabelecendo variáveis controláveis, portanto, tratando-se de uma pesquisa experimental. O projeto de experimento proposto é do tipo fatorial cruzado com dois fatores (MONTGOMERY, 1991; RIBEIRO e TEN CATEN, 2001).

Inicialmente serão moldados prismas experimentais com diferentes combinações dos fatores, procedendo então à retirada de testemunhos que serão submetidos a ensaios de resistência mecânica e de permeabilidade. Paralelamente, foi feita uma revisão bibliográfica sobre o tema, com o objetivo de fundamentar a pesquisa e mantê-la atualizada.

#### 1.5. LIMITAÇÕES

A pesquisa apresenta as seguintes limitações:

- Estudo do CCR enriquecido em prismas experimentais no canteiro da UHE Mauá, sem considerar os aspectos práticos da sua aplicação na barragem;
- Utilização dos mesmos materiais e mão de obra empregada na construção do empreendimento, a fim de alcançar a máxima similaridade com as condições de campo, guardadas às devidas proporções;
- Os resultados referem-se somente a ensaios de resistência à compressão, à tração e de permeabilidade, pela sua relevância em obras de barragens.

#### 1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é estruturado em cinco capítulos conforme descrito abaixo:

- Capítulo 1 - Introdução  
Apresenta uma breve introdução sobre o tema, e definições gerais da pesquisa, como objetivos, hipóteses, justificativas, método e limitações;
- Capítulo 2 – CCR aplicado em barragens  
Trata-se de uma revisão bibliográfica sobre conceitos de barragens de CCR, entre eles: histórico, conceito da técnica, considerações de projeto, dosagem e ensaios específicos;

- **Capítulo 3 – Aspectos da execução do CCR**  
Aborda aspectos de execução de barragens de CCR, como detalhamento do processo construtivo, controle de qualidade e inovações tecnológicas recentes, com destaque para o CCR rampado e o CCR enriquecido;
- **Capítulo 4 - Programa experimental**  
Apresenta as características da UHE Mauá, bem como detalhamento do projeto de experimento, equipamentos e materiais empregados, e descrição dos procedimentos realizados;
- **Capítulo 5 - Resultados e análise**  
Aborda inicialmente os resultados das caldas e dos concretos, após os resultados do CCR enriquecido, comparação dos resultados com dados do controle da obra, e por fim, análise de custos;
- **Capítulo 6 - Considerações finais**  
Apresenta as principais conclusões sobre o estudo e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. CCR APLICADO EM BARRAGENS

### 2.1. HISTÓRICO

As primeiras barragens utilizadas na história da humanidade eram executadas em alvenaria, enrocamento e mistas, mas com a descoberta do cimento Portland por Joseph Aspdin em 1824, o concreto passou então a ser empregado na sua construção, inicialmente através de métodos empíricos baseados em estruturas semelhantes em alvenaria, sem cuidados especiais quanto ao controle tecnológico do material (WENDLER, TURRA e SERIGHELI JUNIOR, 2007).

A primeira barragem executada unicamente de concreto que se tem registro é a barragem de San Mateo, nos Estados Unidos, construída entre 1887 e 1889, porém, a primeira a apresentar dados de controle tecnológico, especificando-se o tamanho dos blocos e limitando-se a relação água/cimento, foi a barragem de Crystal Springs, com 46,2 m de altura, na Califórnia, em 1888 (CBGB, 1989).

A partir do início do século XX, o concreto passou a ser usado intensamente na construção de barragens, quando a técnica apresentou considerável desenvolvimento, através da introdução de controle de qualidade mais rigoroso e investigação mais detalhada dos materiais, com destaque para a execução da barragem de Hoover, nos Estados Unidos (PACELLI DE ANDRADE, 1996).

Após a segunda guerra mundial, houve um desenvolvimento intenso das barragens de materiais soltos, face utilização de equipamentos de terraplenagem viabilizada através da indústria de materiais pesados. Hadley (1941 apud MARQUES FILHO, 2005) sugeriu então que fossem aplicadas as técnicas usadas em barragens de terra na execução de maciços em concreto, utilizando-se um concreto com consistência relativamente seca e que suportasse o tráfego dos equipamentos (caminhão, trator e rolo) com desempenho semelhante ao concreto massa convencional.

As primeiras aplicações do CCR em barragens ocorreram na década de 60, com destaque para a ensecadeira da barragem de Shimen, em Taipei, que utilizou concreto como núcleo impermeável da estrutura, e a barragem de Alpe Gera, construída entre 1961 e 1964 na Itália (TRABOULSI, 2007). Nessa utilizou-se processo misto compreendendo compactação com rolos vibratórios e o conceito de



concreto lançado em camadas de ombreira a ombreira adensado com bancada de vibradores de imersão adaptada em tratores (GENTILE, 1964).

A Figura 2.1 mostra a seção transversal da ensecadeira da barragem de Shimen, que posteriormente seria incorporada à mesma.



FIGURA 2.1 – SEÇÃO TRANSVERSAL DA ENSECADEIRA DA BARRAGEM DE SHIMEN (PACELLI DE ANDRADE, 1991)

Nos anos 70, foram realizados vários estudos de laboratório sobre a técnica de compactação do concreto e concreto pobre, com substituição extensiva de cimento por pozolana, desenvolvendo processos de preenchimento de vazios e aumento da compacidade (ICOLD, 1997). Destacam-se os trabalhos de:

- Raphael (1970), sobre a otimização de barragens de concreto á gravidade, tratando-o ainda como um material grosseiro;
- Moffat (1973), sobre o desenvolvimento de CCR aplicado a barragens de concreto;
- Cannon (1974), sobre testes de compactação obtidos na barragem de Tims Fords, nos Estados Unidos.

Em 1975, no Paquistão, foi construída a barragem de Tarbela, marcada pela aplicação de grandes volumes de CCR, o qual foi utilizado como reposição de alinhamento em seções rompidas de túneis, ainda como material grosseiro, e também na ensecadeira com maior rigor no controle de qualidade (METHA e MONTEIRO, 2008).

A barragem de Willow Creek nos Estados Unidos (Figura 2.2), construída em 1982, foi considerada a primeira grande obra utilizando CCR, com 52 m de altura e 317.000 m<sup>3</sup>. O projeto especificou baixo consumo de material cimentício, e proteção a montante com placas pré-moldadas de concreto, mas sem considerar qualquer elemento de ligação entre camadas. Após entrar em operação, foram observados diversos vazamento acima dos limites de projeto, os quais foram corrigidos com injeções de calda de cimento (SCHRADER, 1982; ANDRIOLO, 1998).



FIGURA 2.2 – BARRAGEM DE WILLOW CREEK (RESENDE, 2005)

Nos Estados Unidos, na década de 80, destacam-se duas obras importantes na evolução de barragens de CCR. A primeira, a barragem de Upper Stillwater, com volume de 1.281.000 m<sup>3</sup> de concreto, com alto teor de material cimentício. Nessa não foram previstas juntas de contração, o que levou à fissuração da barragem e vazamento expressivo. Porém, mesmo com esse problema, obteve-se um concreto com excelentes propriedades mecânicas e baixa permeabilidade. A segunda barragem de destaque foi Elk Creek, iniciada em 1986 e paralisada por questões ambientais em 1987, cujo projeto previu a execução de camadas de 60 cm de altura, e quatro subcamadas com aplicação de argamassa de ligação entre elas (RICHARDSON, 1992; SCHRADER, 1992).

No Japão, foram construídas as barragens de Shimajigawa, em 1982, com 165.000 m<sup>3</sup> de concreto, e a barragem de Tamagawa, em 1987, com 100 m de altura e 1.150.000 m<sup>3</sup>, ambas empregando a técnica denominada RCD (*Roller Compacted Dam*), com critérios estruturais muito conservadores devido a problemas sísmicos recorrentes no país (MARQUES FILHO, 2005). Nessa técnica o concreto é

aplicado em blocos monolíticos de 15 m de largura, com juntas cortadas após a compactação (HANSEN e REINHARDT, 1991; ANDRIOLO, 1998).

O desenvolvimento da técnica do CCR possibilitou o seu emprego em obras de responsabilidade crescente, a exemplo da barragem de Miel I na Colômbia (Figura 2.3), terminada em 2002, com 188 m de altura e executada em 25 meses. Localizada em uma região sismicamente ativa, é hoje a mais alta barragem de CCR do mundo. Seu projeto considerou zoneamento do maciço em quatro regiões com consumos de cimento variando de 85 a 150 kg/m<sup>3</sup>, e controle de percolação através do uso de película de PVC com faixas soldadas termicamente (SANTANA e CASTELL, 2004).



FIGURA 2.3 – VISTA PANORÂMICA DA BARRAGEM DE MIEL I (SANTANA e CASTEL, 2004)

Registra-se um grande crescimento na execução de barragens de CCR no mundo, entre 1996 e 2002, pois até 1996 haviam sido concluídas 157 barragens em 20 países e, em 2002, contava-se com 251 barragens concluídas e mais 34 em execução, distribuídas em 35 países, com destaque para a China, com número considerável de estruturas, seguida pelo Brasil (TRABOULSI, 2007).

No Brasil, a primeira aplicação do CCR foi no canteiro de obras da Usina Hidrelétrica de Itaipu, em 1976. Na mesma obra, em 1978, foram desenvolvidos diversos estudos através de maciços experimentais e realização de ensaios de laboratório, o que levaria à sua aplicação na rampa de acesso na Itaipu Binacional (ANDRIOLO, 1998; KUPERMAN, 1996; NETTO et al., 1995). Também nesse ano

foram executados 40.000 m<sup>3</sup> de CCR no preenchimento de adufas de desvio da Usina Hidrelétrica de São Simão, em Goiás (TRABOULSI, 2007).

Em 1986, entretanto, foi construída a barragem de Saco de Nova Olinda, com 56 m de altura e 135.000 m<sup>3</sup> de concreto, a primeira barragem de CCR com eixo longitudinal em curva no mundo e que causou grande impacto, pela velocidade de construção (apenas 110 dias) e economia (KUPERMAN, 1996).

Na década de 90, foram executadas as duas primeiras barragens de grande porte em CCR, ambas no Estado do Paraná.

- Derivação do Jordão, da COPEL, em 1996, com 547.000 m<sup>3</sup> de CCR e 95 m de altura (Figura 2.4). Apesar de ter sido projetada em solução de concreto a gravidade, possui eixo longitudinal curvado por motivos hidráulicos, e como característica importante, licitação com possibilidade de escolha entre arranjo em barragem de CCR ou barragem de enrocamento com face de concreto (MARQUES FILHO, et al., 1996).
- Usina Hidrelétrica Salto Caxias, também da COPEL, construída em 1998, com 66 m de altura e um volume de CCR de 912.000 m<sup>3</sup> (Figura 2.5). Seu projeto considerou vertedouro embutido no corpo do maciço e possibilidade de ocorrência de galgamentos durante a execução, tendo ocorrido sete no total sem qualquer dano à praça de CCR, apesar de danos severos à fundação (MARQUES FILHO, 2005).

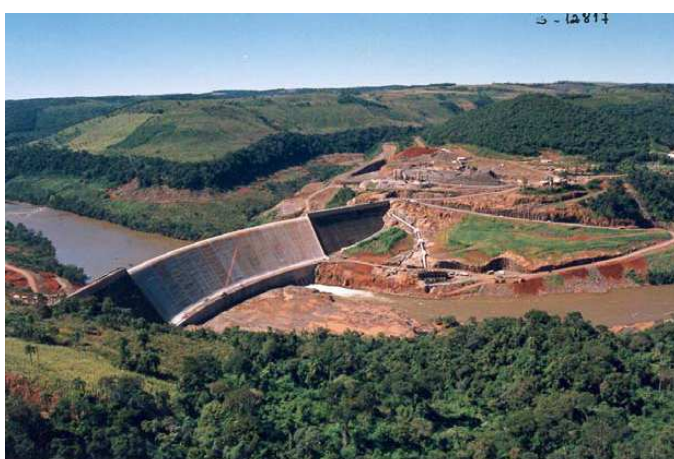


FIGURA 2.4 – BARRAGEM DA DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO (MOSER, MUSSI e OLIVEIRA, 2005)





FIGURA 2.5 – VISTA GERAL DA UHE SALTO CAXIAS (MOSER, MUSSI e OLIVEIRA, 2005)

A barragem de Dona Francisca (Figura 2.6), iniciada em 1998, no Rio Grande do Sul, foi pioneira na utilização de maciços experimentais de laboratório na tomada de decisão sobre o processo executivo e auxílio na definição das misturas iniciais na construção da obra. Obteve-se um CCR de excelente qualidade, sob o aspecto da resistência mecânica, permeabilidade e homogeneidade, com coeficientes de variação expressivamente baixos em relação a outros empreendimentos hidráulicos (FRANCO et al., 1998; MOSER et. al., 2003; CBGB, 1989).

Também outras barragens recentes apresentaram inovações tecnológicas, por exemplo, a barragem de Lajeado, no Tocantins, com 43 m de altura, sendo a primeira a aplicar na construção o método do concreto rampado ou chinês, lançando um total de 210 m<sup>3</sup> de concreto (BATISTA et. al., 2002; BATISTA et. al., 2002b).



FIGURA 2.6 – VISTA GERAL DA UHE DONA FRANCISCA (MARQUES FILHO, 2005)

## 2.2. CONCEITO

Segundo a *Portland Cement Association* (PCA, 1987), o concreto compactado com rolo é um material misturado, espalhado e compactado com equipamentos tradicionalmente empregados na pavimentação rodoviária, com consistência seca e trabalhabilidade tal que permita a compactação por rolos vibratórios.

Oliveira e Salles (1995) definem o CCR como um concreto de consistência seca (*no slump*), aspecto arenoso e com propriedades próprias, que é transportado, espalhado e compactado de forma contínua, através de máquinas normalmente aplicadas em obras de terra e enrocamento.

Marques Filho (2005) descreve o CCR como uma técnica construtiva com peculiaridade de uso intensivo de equipamentos empregados tipicamente em obras de terra/enrocamento, utilizando um material conhecido (concreto), objetivando máxima velocidade de lançamento, aliado a custos baixos e teores de cimento relativamente pequenos para minimização dos efeitos de variações volumétricas de origem térmica.

Apesar de ligeiramente diferenciados, os conceitos de CCR convergem para o aumento da produtividade na execução, buscando maiores velocidades de lançamento, reduzindo o consumo de cimento e incidência de mão de obra, ou seja, uma técnica que representa uma evolução natural das barragens de concreto convencional, cujo projeto previa um cronograma invariavelmente extenso.

A automação da técnica de CCR, no entanto, depende de pessoal treinado, equipamentos ajustados e materiais definidos. Porém, o treinamento inicial da equipe mostra-se dificultoso, tendo como característica desse tipo de obra a melhora qualitativa dos serviços com o tempo, havendo maior probabilidade de ocorrência de defeitos nas áreas próximas à fundação (MARQUES FILHO, 2005).

A Figura 2.7 mostra um esquema típico da praça da barragem de Salto Caxias, onde se pode observar o processo predominantemente mecanizado e com baixa incidência de mão de obra.



FIGURA 2.7 – ESQUEMA TÍPICO DA PRAÇA DA BARRAGEM DE SALTO CAXIAS (MARQUES FILHO, 2005)

Segundo Lacerda et al. (2006), o CCR apresenta as seguintes vantagens em relação a outros concretos em obras de barragens:

- Produtividade superior a outros processos;
- Redução do custo (cronograma reduzido);
- Mão de obra otimizada e de fácil aplicação;
- Aproveitamento de novos materiais;
- Maior fluência (menor probabilidade de fissuras térmicas);
- Credibilidade no meio técnico;
- Modernização dos processos executivos;
- Menor interferência das condições climáticas no lançamento.

A redução no custo pode ser atribuída ao uso de equipamentos de grande produção, redução do consumo de materiais de custo elevado, redução sensível no uso de formas, e redução e simplificação na infraestrutura de apoio (RESENDE, 2005). A técnica do CCR também diminui o risco de ocorrência de fissuras térmicas e de reações deletérias, principalmente em função do baixo consumo de cimento.

### 2.3. CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

Barragens à gravidade são dimensionadas basicamente para estabilidade quanto ao tombamento e escorregamento e verificação do estado de tensões. Considera-se no equilíbrio dos esforços a resistência à tração e a resistência à

compressão (devido à sua influência na tensão cisalhante entre camadas), mas também o controle de percolação de água e análise das variações volumétricas (PCA, 1987).

### 2.3.1. Controle de Percolação

O controle de percolação é feito por zoneamento da barragem junto às faces, adotando um material com permeabilidade controlada, geralmente, o concreto convencional ou mesmo o CCR com menor permeabilidade. O concreto especificado deve possuir estabilidade volumétrica, ou seja, possuir capacidade de alongamento adequado de modo a evitar a percolação por fissuração térmica (PACELLI DE ANDRADE e ANDRIOLO, 1996).

Também, o projeto deve prever um sistema de drenagem composto por drenos e galerias para redução das pressões neutras no maciço, e solução que não traga complicações ao processo de execução do CCR (PACELLI DE ANDRADE e ANDRIOLO, 1996). A Figura 2.8 mostra a galeria de drenagem da barragem de Capanda, na Angola, cuja proximidade à face de montante impossibilitou a operação conjunta dos equipamentos, interferindo na eficiência do processo.



FIGURA 2.8 – GALERIA DE DRENAGEM DA BARRAGEM DE CAPANDA (RESENDE, 2005)



### 2.3.2. Variações Volumétricas de Origem Térmica

O concreto está sujeito a elevações consideráveis de temperatura nas primeiras idades devido a reações de hidratação do cimento. Como consequência, a massa de concreto expande-se, quando ainda é deformável, e retrai-se até equilibrar a temperatura com o meio ambiente, mas nessa fase ganha rapidamente tanto resistência como rigidez, gerando tensões que se ultrapassarem sua resistência à tração, levam à fissuração (ISAÍÁ et al., 2005; PAULON, 1987).

A verificação da estabilidade dimensional do concreto devido ao efeito térmico é feita através da equação 2.1.

$$\varepsilon_F = K_A \cdot \alpha \cdot (v_L + v_{eh} - v_A) \quad (2.1)$$

Onde:

$\varepsilon_F$  = Capacidade de alongamento do concreto;

$K_A$  = Condição de restrição;

$\alpha$  = Coeficiente de expansão térmica do concreto;

$v_L$  = Temperatura de lançamento do concreto;

$v_{eh}$  = Elevação adiabática de temperatura;

$v_A$  = Temperatura ambiente.

O fenômeno térmico no concreto está basicamente ligado às restrições ao movimento durante o resfriamento e ao diferencial de temperatura gerado, conforme observado na Figura 2.9, mas também depende de outros fatores, como: geometria da estrutura, propriedades do concreto endurecido, propriedades da rocha de fundação, tipo de cura, altura das camadas e intervalo de execução, e dimensionamento de juntas de contração (ISAÍÁ et al., 2005).

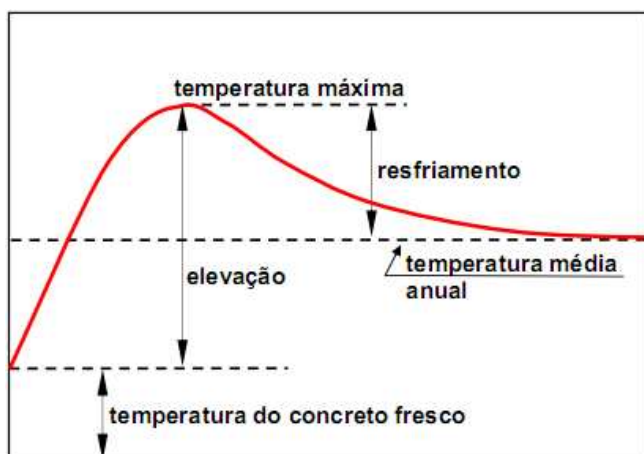


FIGURA 2.9 – DIFERENCIAL DE TEMPERATURA NO CONCRETO (WENDLER, TURRA e SERIGHELI JUNIOR, 2007)

No projeto de barragens de CCR a altura das camadas não representa preocupação, pois, apesar do intervalo de execução ser bastante pequeno (horas), apresenta dimensões reduzidas (0,30 a 0,35 m), o que minimiza a elevação de temperatura e facilita a dissipação do calor para o meio (PAULON, 1987).

Como as barragens de concreto são construídas em estruturas monolíticas, e no caso do CCR, de maneira contínua, juntas de contração são necessárias para acomodar as variações volumétricas decorrentes do resfriamento ou secagem (ICOLD-CIGB, 1997a). A distância entre elas pode variar de 12 a 18 m, dependendo dos estudos de temperatura e características da estrutura e do material (MARQUES FILHO, 2005).

## 2.4. DOSAGEM

### 2.4.1. Considerações Gerais

A dosagem do CCR baseia-se em dois conceitos principais, o da tecnologia do concreto, considerando a relação água/cimento como um dos parâmetros básicos, e o de compactação de materiais soltos, que se baseia no controle do teor ótimo de umidade para se obter a máxima massa específica do material no campo (METHA e MONTEIRO, 2008).

Qualquer que seja o método adotado, os estudos de dosagem devem levar em consideração o aspecto econômico, procurando aproveitar a disponibilidade de

materiais da região para reduzir custos com transporte, e objetivar a máxima densidade e grau de compactação, para atender as especificações de projeto (PACELLI DE ANDRADE e ANDRIOLO, 1998).

Deve-se reduzir ao máximo o consumo de cimento para evitar as reações deletérias e reações de hidratação do aglomerante, além de permitir uma economia de escala no processo (HASPARYK et al., 2003). A substituição de parte do cimento por pozolana e a combinação de agregados com distribuição contínua para reduzir os vazios da mistura são alternativas usualmente empregadas (PACELLI DE ANDRADE e ANDRIOLO, 1998).

No Brasil, devido à escassez de pozolana atualmente existente, utiliza-se agregado pulverizado para aumentar a coesão e a trabalhabilidade do concreto, bem com diminuir a permeabilidade, em quantidades entre 120 e 160 kg/m<sup>3</sup> (GRAÇA et al., 2003).

Devem-se tomar cuidados para garantir a trabalhabilidade necessária em todas as fases executivas, de modo a se obter o grau de compactação ideal, com destaque para o controle do teor de água na mistura, e a quantidade total de finos para fechamento da curva granulométrica (PAULON et al, 2004). A medida da permeabilidade do concreto fresco, através do procedimento desenvolvido por FURNAS (a ser detalhado no item 2.5.4.) fornece um parâmetro eficaz para avaliação da granulometria do CCR.

Também se costuma introduzir aditivos retardadores de pega na massa para aumentar o intervalo de aplicação do CCR (GRAÇA et al., 2003).

#### 2.4.2. Considerações sobre a Granulometria

O tamanho dos agregados, curva granulométrica e quantidade de finos, influenciam diretamente no processo de dosagem do CCR, conforme descrito a seguir:

##### a) Tamanho dos agregados

O aumento da dimensão máxima característica dos agregados leva a menores consumos de cimento, menores teores de água e de areia, para manter a trabalhabilidade e resistência especificados (ANDRIOLO, 1998; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997). A Figura 2.10 mostra os resultados obtidos na dosagem da UHE Itumbiara, variando-se a dimensão máxima dos agregados graúdos para

resistências médias à compressão de 13 MPa e 25 MPa, onde foi utilizado agregado miúdo composto por 80% de areia natural e 20% de areia artificial.

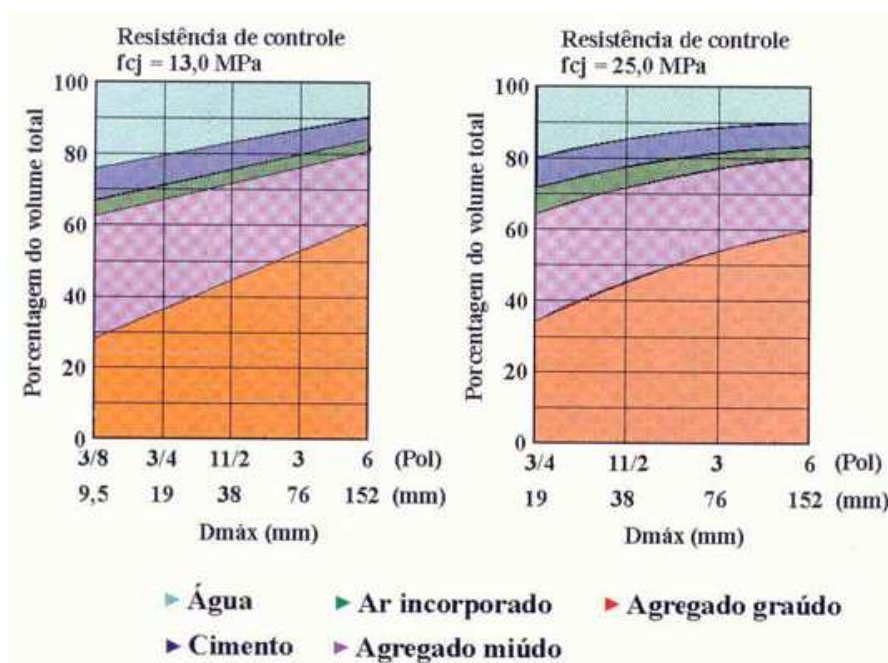


FIGURA 2.10 – VOLUMES ABSOLUTOS DOS COMPONENTES DOS CONCRETOS UTILIZADOS NA UHE ITUMBIARA (MARQUES FILHO, 2005)

Apesar da vantagem econômica, o emprego de agregados com dimensão máxima característica maior que 38 mm aumenta a tendência de segregação durante o lançamento, devendo-se analisar os custos com equipamentos e mão de obra para contornar o problema (ANDRIOLO, 1998).

#### b) Curvas granulométricas

Segundo Basílio (1984), o uso de curvas contínuas mostra-se mais adequado, minimizando o consumo de cimento para uma mesma consistência e relação água/cimento. Concretos com granulometria descontínua, em geral apresentam menor trabalhabilidade e exigência de maior energia de compactação.

São utilizadas graduações geométricas e suas assemelhadas, que consistem em curvas granulométricas contínuas onde as porcentagens retidas em peneiras sucessivas do conjunto normal mantêm uma progressão geométrica entre si. Como exemplo, uma graduação de setenta por cento significa que uma peneira qualquer da série normal reterá 70% da massa retida na peneira imediatamente superior.

A Figura 2.11 mostra as curvas granulométricas mais usadas na dosagem do CCR, com destaque para a curva cúbica de Bolomey-Fuller, que apresenta uma quantidade alta de finos, com 12,5% do material passando na peneira nº 100 e 10% passando na peneira nº 200, o que possibilita uma baixa relação agregado gráudo/agregado miúdo (GENTILE, 1964; ANDRIOLO, 1998; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997).

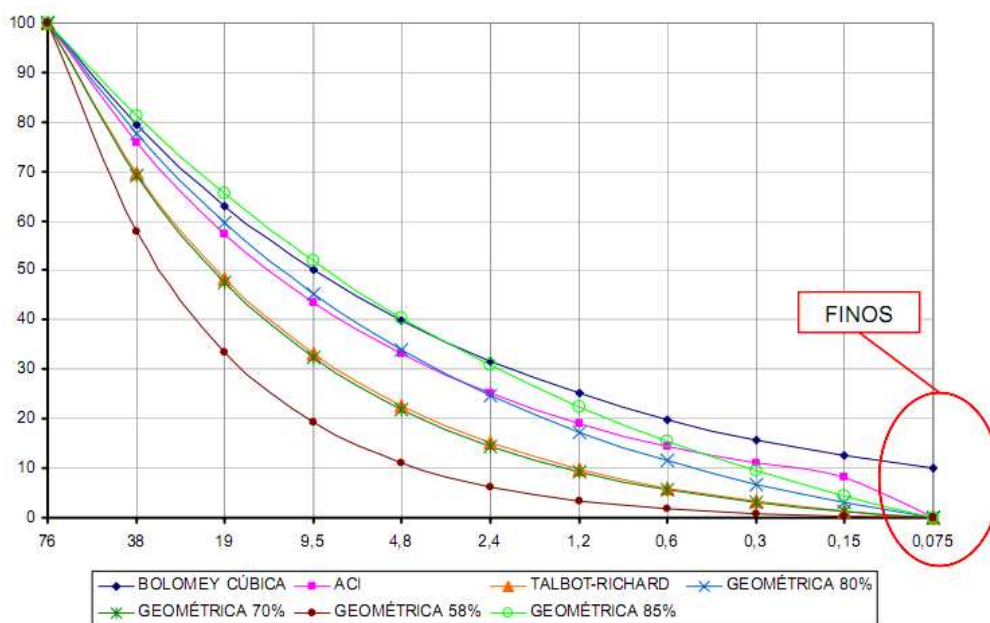


FIGURA 2.11 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS UTILIZADAS NA DOSAGEM DO CCR (MARQUES FILHO, 2005)

### c) Quantidade de finos

O uso de partículas finas no concreto influi na sua trabalhabilidade, aumentando a coesão e como benefício adicional aumenta a massa específica e diminui a permeabilidade devido ao fechamento dos vazios da massa (HANSEN e REINHARDT, 1991; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997; HASPARYK et al., 2003). Apesar de partículas muito finas aumentarem o consumo de água devido ao aumento da superfície específica total dos agregados, sua presença no concreto tem função lubrificante, reduzindo o atrito entre os grãos maiores (BASÍLIO, 1984).

Como o CCR possui consistência bastante seca, com baixo teor de umidade, o emprego de finos o torna muito sensível à perda de água durante a execução, exigindo comumente a utilização de aditivos plastificantes e retardadores de pega,

principalmente em regiões com grandes variações sazonais de clima, como nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (GRAÇA et al., 2003).

#### 2.4.3. Misturas Típicas

Atualmente, existem cinco tipos de misturas de CCR:

- CCR Pobre (Lean RCC), concreto com baixos teores de material cimentício (menos de 100 kg/m<sup>3</sup>) e sem preocupações especiais com os finos, resultando um material permeável e pouco homogêneo ao longo da espessura da camada.

Pode apresentar caminhos de percolação de água pelo maciço, cujo controle é feito pelo emprego de membranas impermeáveis ou de concreto convencional na face de montante (ANDRIOLO, 1998);

- RCD (Roller Compacted Dam), método desenvolvido no Japão com utilização de concreto mais úmido e com maior teor de argamassa, semelhante ao concreto massa convencional.

Possui critérios de projeto muito conservadores, justificados por histórico de problemas sísmicos no país e rigor na especificação da durabilidade da estrutura, destacando: envelopamento do RCD por concreto convencional, restrições quanto à permeabilidade do material, restrições quanto à taxa de colocação do concreto para evitar problemas de retração térmica, e limitação do tamanho dos blocos, adotando juntas de contração a cada 15 m. O teor de material cimentício depende das especificações de projeto (HANSEN e REINHARDT, 1991; ANDRIOLO, 1998; NAGATAKI, FUJISAWA e KAWASAKI, 2008);

- CCR com Alto Teor de Pasta (Hight Paste RCC), concreto com alto teor de material cimentício (maiores que 150 kg/m<sup>3</sup>), onde se procura obter coeficientes de permeabilidade similares ao concreto convencional.

Porém, está sujeito à fissuração na face de montante, devido à combinação dos efeitos térmicos do aglomerante com as ações ambientais, como a variação de temperatura e de umidade do ar, insolação e presença do vento, ou mesmo variações decorrentes do enchimento do reservatório (MARQUES FILHO, 2005; PACELLI DE ANDRADE e ANDRIOLO, 1998);

- Concreto com Teor Médio de Argamassa (Medium Paste RCC), com teor de material cimentício entre 100 e 149 kg/m<sup>3</sup>, busca aliar os conceitos de economia do CCR Pobre com a homogeneidade obtida no CCR com Alto Teor de Pasta (HANSEN e REINHARDT, 1991);
- CCR com Alto Teor de Finos (ATF), conhecido como “Método Brasileiro”, determina o uso de agregado miúdo pulverizado em substituição à pozolana, cuja disponibilidade atual é limitada.

A aplicação de pozolanas no concreto surgiu da necessidade em se reduzir os consumos de cimento, para controlar os efeitos das variações volumétricas de origem térmica, inibição da reação álcali-agregado, e acerto da quantidade de finos na mistura para garantia da trabalhabilidade e redução da permeabilidade do concreto.

A primeira aplicação do método ocorreu na barragem de Capanda, na Angola, inicialmente para inibição da reação álcali-agregado, mas apresentou vantagens quanto à durabilidade, abrasão e economia (PAULON, KREMPEL e CREVILARO, 1992; PACELLI DE ANDRADE et al., 1997). A recomendação indicava que na obra 7% da areia artificial deveria ser composta por partículas passantes na peneira nº 100.

## 2.5. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CCR

### 2.5.1. Massa Unitária e *Cannon Time* Através do Aparelho de Vebê

A determinação da trabalhabilidade (*Cannon Time*) e massa unitária compactada do CCR são feitos através do ensaio de Vebê modificado, descrito no procedimento de ensaio FURNAS 01.006.011 (TRABOULSI, 2007).

No ensaio são utilizados uma mesa vibratória e um recipiente transparente de acrílico com volume igual a 9,2 l, correspondendo a um cilindro com diâmetro igual a 24,2 cm. O recipiente foi desenvolvido pelo Eng. Ruy Dikram Steffen do Laboratório de Materiais e Estruturas, LAME, em Curitiba, e possibilita a visualização do preenchimento dos vazios de CCR na definição do tempo de adensamento (PACELLI DE ANDRADE, 1996).

A determinação do *Cannon Time* consiste em preencher o recipiente de acrílico com CCR fresco até o topo, rasar a superfície com régua, e então medir o

tempo decorrido entre o acionamento da mesa vibratório e a acomodação do concreto no recipiente até formar uma película de argamassa nas bordas. A presença de argamassa visível em toda a superfície aparente indica o preenchimento dos vazios e sua compactação, conforme pode ser observado na Figura 2.12.



(a) ACIONAMENTO DA MESA



(b) VAZIOS PREENCHIDOS

FIGURA 2.12 – DETERMINAÇÃO DO *CANNON TIME* (TRABOULSI, 2007)

A massa unitária é determinada pela razão entre a massa e o volume do concreto adensado. Para tanto, após o ensaio de trabalhabilidade, mantém-se a mesa vibratória acionada por mais 120 segundos, após medindo-se a massa do conjunto. Completa-se com água o recipiente e mede-se a massa novamente, obtendo-se facilmente o volume de água inserido. Conhecendo-se o volume e massa do recipiente vazio, chega-se ao volume e massa do CCR compactado.

O preenchimento com água até o topo do recipiente e obtenção da massa total pode ser visto na Figura 2.13.





FIGURA 2.13 – DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA COMPACTADA

### 2.5.2. Massa Unitária e Teor de Água Unitária Através do Aparelho DMA

O aparelho DMA (dispositivo medidor de água) é um recipiente cilíndrico de acrílico, provido de um sifão, cujo volume de água até o mesmo é conhecido, denominado “volume de equilíbrio”. Foi desenvolvido pelo Laboratório de concreto de FURNAS e permite a obtenção da massa unitária do CCR e água unitária da mistura, ou consumo de água.

A água unitária é obtida de correlações com curvas (massa unitária x água unitária, massa unitária x massa específica teórica, massa unitária x umidade teórica) previamente determinadas para cada dosagem de CCR estudada. As curvas são obtidas de ensaios, mantendo-se constantes o consumo de cimento e teor de areia do concreto, e variando-se o consumo de água (ANDRADE et al., 2003).

Sendo o teor de umidade do CCR um dos principais parâmetros sujeito a variabilidades durante a execução, a utilização do aparelho DMA fornece uma ferramenta simples e eficaz no controle de qualidade do processo no campo (ANDRADE et al., 2003).

Após definição do volume de equilíbrio, esvazia-se o dispositivo e coloca-se uma amostra de CCR de aproximadamente 3.500 gramas, pesando assim o conjunto. Na sequência, adiciona-se metade do volume de equilíbrio e agita-se o conjunto para eliminar eventuais bolhas de ar existentes, colocando então o restante do volume de equilíbrio e aguardando de 5 a 10 minutos para que ocorra a sedimentação das partículas finas de CCR. Por último, retira-se, com a abertura do

sifão, o volume de água deslocado que corresponde ao volume da amostra de CCR. A Figura 2.14 mostra os últimos passos da execução do ensaio com DMA.



(a) PREENCHIMENTO COM ÁGUA



(b) ABERTURA DO SIFÃO

FIGURA 2.14 – SEQUÊNCIA DO ENSAIO COM DMA (MARQUES FILHO, 2005)

Conhecendo-se a massa do recipiente vazio, pode-se determinar a massa unitária do CCR, através da equação 2.2.

$$M_{esp} = \frac{M_c}{V_{deslocado}} \quad (2.2)$$

Onde:

$M_{esp}$  = Massa específica do CCR (absoluta)

$M_c$  = Massa do concreto inserido no DMA

$V_{deslocado}$  = Volume de água deslocado

### 2.5.3. Densidade, Umidade e Água Unitária com o Densímetro Nuclear

O densímetro nuclear é um equipamento que vem sendo utilizado na determinação de umidade e densidade de solos desde o final da década de 50. Porém, nos últimos anos passou a ser empregado com grande frequência em estruturas de concreto compactado com rolo, sejam elas barragens, usinas hidrelétricas ou pavimentos rígidos, pois apresenta vantagens em termos de rapidez e confiabilidade.

Sua utilização é de notória importância em barragens de concreto, na realização do controle de qualidade durante a construção, antes da pega inicial e para a pesquisa tecnológica, avaliando as propriedades do CCR (massa unitária, água unitária e umidade) durante o lançamento. Também representa considerável economia na obra, pois na prática mostra-se de 6 a 10 vezes mais rápida que as técnicas convencionais (TRABOULSI, 2007).

O equipamento é composto por uma fonte radioativa de Césio ( $Cs\ 137$ ), uma de Berílio ( $Br$ ) e uma de Amerício ( $Am\ 241$ ), e um detector (haste) para medição dos raios gama emitidos. Dependendo da densidade do material em teste, a intensidade de raios medida pode ser maior ou menor.

A NBR NM 4 (ABNT, 2000) descreve dois métodos não destrutivos para a determinação da densidade do CCR, mediante o uso de densímetro nuclear:

- Método A (transmissão direta): O método por transmissão direta é “pseudo” não destrutivo, pois a fonte de raios gama é introduzida no material através de um pequeno furo;
- Método B (retrodispersão): O método de retrodispersão é não destrutivo e bastante rápido, pois tanto a fonte de raios gama quanto seu detector ficam na superfície do material.

Existe ainda um terceiro método, denominado “colchão de ar”, onde o equipamento localiza-se a uma pequena distância acima da superfície. Um esquema contendo os três métodos e a aplicação do equipamento na UHE Lajeado pode ser observada nas Figuras 2.15 e 2.16, respectivamente.

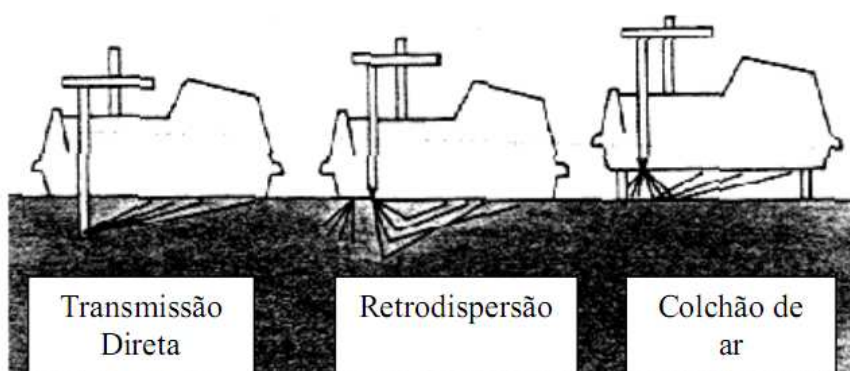


FIGURA 2.15 – ESQUEMA DE UTILIZAÇÃO DO DENSÍMETRO NUCLEAR (MARQUES FILHO, 2005)



FIGURA 2.16 – DENSÍMETRO NUCLEAR UTILIZADO NO CONTROLE DA UHE LAJEADO (MARQUES FILHO, 2005)

#### 2.5.4. Permeabilidade do Concreto Fresco

A permeabilidade é a propriedade que permite a passagem de um fluido através de sólidos. Segundo Vicari et. al. (1998), sua determinação no estado fresco permite uma análise prévia de misturas de concreto, com relação ao fechamento do esqueleto granular, fornecendo um parâmetro auxiliar à dosagem e ao controle de campo.

O método de ensaio vem de uma adaptação do ensaio de permeabilidade em solos finos, em permeâmetro de carga variável (ABGE, 1996) e apresenta a seguinte sequência: moldagem e adensamento de corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 15,4 cm de diâmetro por 17,6 cm de altura, em mesa vibratória por 120 segundos; instalação do corpo de prova no conjunto de equipamentos que forma o permeâmetro; aplicação de água sob pressão e medição dos tempos necessários para a percolação de volumes predeterminados.

A Figura 2.17 mostra o ensaio de permeabilidade em andamento, cujo tempo de duração é de 30 minutos, e o coeficiente de permeabilidade é calculado através da Lei de Darcy, pela equação 2.3.

$$k = C \left( \frac{aL}{A\Delta t} \right) \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

$k$  = Coeficiente de permeabilidade (m/s)

$C$  = Correção da temperatura da água

$a$  = Área da seção transversal da bureta ( $m^2$ )

$L$  = Altura do corpo de prova (m)

$A$  = Área de seção transversal do corpo de prova ( $m^2$ )

$h_1$  = Carga hidráulica inicial (m)

$h_2$  = Carga hidráulica final (m)

$\Delta t$  = Tempo para a carga hidráulica passar de  $h_1$  para  $h_2$  (segundos)



FIGURA 2.17 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE EM ANDAMENTO (TRABOULSI, 2007)

#### 2.5.5. Propriedades do CCR Endurecido

A determinação das propriedades do CCR no estado endurecido é feita através dos mesmos métodos de ensaio aplicados para o concreto convencional, a partir de corpos de prova moldados, ou testemunhos extraídos de maciços experimentais ou do próprio corpo da barragem, destacando-se:

- Resistência à compressão axial - NBR 5739 (ABNT, 2007);
- Resistência à tração por compressão diametral - NBR 7222 (ABNT, 1994);

- Resistência à tração simples, conforme métodos desenvolvidos em FURNAS (dispositivo Leroy) e no LAME;
- Massa específica - NBR 9778 (ABNT, 2005);
- Permeabilidade - NBR 10786 (ABNT, 1989);
- Módulo de elasticidade - NBR 8522 (ABNT, 1984);
- Cisalhamento direto - FURNAS 04.007.006.

A moldagem de corpos de prova em CCR é feita em mesa vibratória, conforme pode ser visto na Figura 2.18, a fim de se obter a máxima similaridade com as condições de campo. O CCR possui consistência mais seca que o concreto convencional, impossibilitando o adensamento manual ou com uso de vibradores de imersão.

O procedimento considera a confecção de corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, moldados em duas camadas vibrando 120 segundos cada, devendo-se tomar como parâmetros de controle: o aparecimento de argamassa no topo da amostra, correlações entre tempo de adensamento e grau de compactação, e treinamento da mão de obra (TRABOULSI, 2007).



FIGURA 2.18 – MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA DE CCR



### 3. ASPECTOS DA EXECUÇÃO DO CCR

#### 3.1. PROCESSO CONSTRUTIVO

Neste item são apresentadas todas as etapas do processo construtivo de barragens de CCR, desde a fabricação do material até o procedimento de cura, e descrição das principais interferências, que afetam diretamente a produtividade final, com destaque para a execução da face de montante.

##### 3.1.1. Fabricação

O CCR pode ser produzido em diversas centrais misturadoras, dependendo da produção requerida e da velocidade de lançamento a ser praticada, destacando:

- Centrais convencionais, com balanças de pesagem e misturas de quantidades discretas de concreto;
- Centrais gravimétricas, com balanças de pesagem controladas por centrais computadorizadas;
- Centrais contínuas, à imagem de *pug-mills*, com dosagem feita através de correias transportadoras com células de carga controladas por centrais computadorizadas;

Normalmente, na fabricação do CCR utiliza-se um tipo de central gravimétrica, de mistura contínua ou baixo tempo de mistura (50 segundos), e cuja linha de produção pode ser dotada de misturadores do tipo forçado (*pug-mill*) (TRABOULSI, 2007).

A Figura 3.1 mostra uma central tipo *pug-mill* utilizada para dosagem e mistura do CCR na barragem de Capanda, na Angola.



FIGURA 3.1 – CENTRAL DE CCR UTILIZADA NA BARRAGEM DE CAPANDA (TRABOULSI, 2007)

### 3.1.2. Transporte

O CCR pode ser transportado até a praça de lançamento por caminhão basculante, correia transportadora ou até mesmo um sistema misto de correia, tubulação e caminhão, dependendo da logística do empreendimento (METHA e MONTEIRO, 2008; RIBEIRO, 1998).

No entanto, o método mais usual é por caminhão, devendo ser tomados cuidados para se evitar a contaminação da praça (através da lavagem das rodas antes do ingresso do caminhão), perda excessiva de umidade e segregação do material.

Na execução da barragem de Miel I o lançamento do CCR foi feito em três etapas, sendo a primeira com o uso de caminhões articulados para colocação do material da fundação. A segunda por sistema contínuo de correias sustentadas por uma torre ancorada na fundação, e por fim, caminhões basculantes alimentados na própria praça da barragem por correia (RESENDE, 2005).

A Figura 3.2 mostra as duas primeiras etapas de transporte do concreto na barragem de Miel I, cuja praça localizava-se em um vale estreito com acesso extremamente difícil.





(a) TRANSPORTE POR CAMINHÕES



(b) TRANSPORTE POR CORREIAS



(c) DETALHE DA CORREIA

FIGURA 3.2 – TRANSPORTE DO CCR NA BARRAGEM DE MIEL I (RESENDE, 2005)

### 3.1.3. Lançamento

O método tradicional consiste em executar o concreto em camadas horizontais longas, com altura variando entre 0,30 e 0,35 m. Esse processo resulta em um tempo de exposição da camada anterior de pelo menos 12 horas até sua cobertura pela camada subsequente, sendo necessária a aplicação da argamassa de ligação entre elas, e, eventualmente, tratamento da superfície, para garantir a monoliticidade e estanqueidade do conjunto (TRABOULSI, 2007).

A Figura 3.3 mostra um esquema do método horizontal de lançamento para lance de concretagem com 2,0 m de altura composto por seis camadas de 0,33 m, e necessidade de elemento de ligação entre todas as camadas.

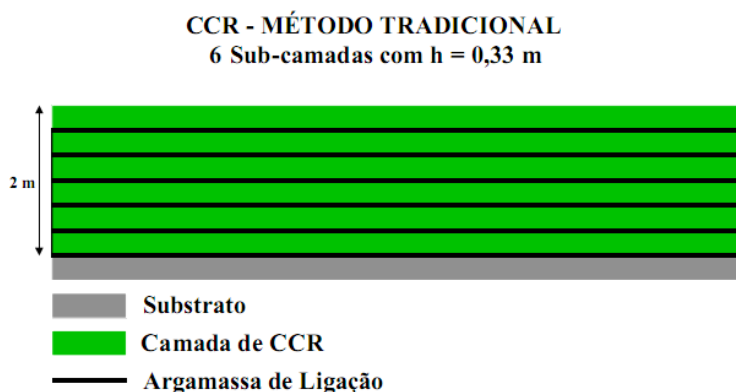


FIGURA 3.3 – ESQUEMA DO MÉTODO HORIZONTAL (BATISTA ET AL., 2002)

Cuidados com a ligação entre camadas justificam-se pela baixa resistência ao cisalhamento e alta permeabilidade nessas regiões, sendo um dos principais motivos de falhas em barragens de concreto, que ocorrem por: segregação na colocação da camada superior, compactação insuficiente na parte inferior da camada, e endurecimento da camada anterior (FORBES, 2003).

A ligação entre camadas é feita mediante a aplicação de argamassa ou “concreto de berço”, geralmente com espessura entre 0,5 e 2 cm e comprimento conforme especificações de projeto. Ambas as soluções devem considerar na dosagem teor de ar incorporado (6 a 10%) para minimizar a segregação e facilitar o espalhamento manual (RESENDE, 2005).

O espalhamento da argamassa de ligação na barragem de Mauá, antes do nivelamento da camada de CCR, pode ser observado na Figura 3.4.



FIGURA 3.4 – APLICAÇÃO DE ARGAMASSA DE LIGAÇÃO NA BARRAGEM DE MAUÁ

A movimentação das formas é feita uma única vez, após a conclusão total do lance de concretagem, utilizando-se guindaste ou empilhadeira. A Figura 3.5 mostra a utilização de formas trepantes no paramento de montante da barragem de Miel I, e o uso de formas deslizantes na barragem da derivação do Rio Jordão.



(a) FORMAS TREPANTES



(b) FORMAS DESLIZANTES

FIGURA 3.5 – FORMAS UTILIZADAS NAS BARRAGENS DE MIEL I E DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO (RESENDE, 2005)

O espalhamento e nivelamento do concreto são realizados com uso de trator de esteira tipo D4, D6 ou D8. Esse equipamento possui uma lâmina com dente curto que possibilita movimentação nos dois sentidos (para frente e para trás), e nas regiões próximas a interferências construtivas, cujo espaço de manobra é limitado, o espalhamento é feito manualmente (RIBEIRO, 1998).

#### 3.1.4. Compactação

O adensamento do CCR é feito com uso de rolos vibratórios, cujo parâmetro de controle é o número de passadas. Esse é definido em aterro experimental de modo que se obtenha a massa específica úmida mínima para atingir o grau de compactação especificado em projeto, com o rolo vibrando na sua capacidade ideal de compactação. Depende das características do rolo, altura da camada, características de dosagem do CCR, entre outros, situando-se geralmente entre seis e dez passadas (TRABOULSI, 2007).

Podem ser utilizados também compactadores manuais, placas vibratórias ou pequenos rolos, em regiões próximas às faces de montante e jusante, junto às

paredes de galerias, ao redor de peças embutidas e demais interferências (ICOLD, 1997; RIBEIRO, 1998).

Durante o processo de compactação, as seguintes considerações devem ser observadas:

- Inicialmente, deve ser executada uma passagem fechada do rolo, ou seja, sem vibração para a selagem de toda a camada;
- O rolo deve evitar fazer manobras ou mesmo parar completamente sobre o concreto, devendo operar predominantemente em linha reta;
- Na compactação de uma faixa determinada, o rolo deve sobrepor à faixa adjacente no mínimo 0,30 m de largura.

### 3.1.5. Cura

Até a aplicação da camada subsequente, o CCR deve ser mantido sob névoa úmida para evitar a evaporação prematura da água do concreto, sendo que para períodos de exposição prolongados segue-se o mesmo procedimento adotado para o concreto convencional.

No Brasil, o processo de cura é feito por nebulização, que pode ser manual ou mecânico. No primeiro, faz-se uso de dispositivos (espingardas ou nebulizadores) ligados à rede de ar e água, restringindo-se o uso de mangueiras para evitar encharcamento da superfície. No segundo, utiliza-se trator agrícola adaptado com nebulizador (Figura 3.6).



FIGURA 3.6 – CURA COM TRATOR AGRÍCOLA ADAPTADO COM NEBULIZADOR (MARQUES FILHO, 2005)

### 3.1.6. Juntas de Contração

Dentre as opções corriqueiras para a execução de juntas de contração em barragens, tem-se a colocação de material não aderente ao concreto, como a aplicação de manta plástica envolvendo peça rígida de madeira que será retirada antes da compactação, cuja sequência de execução é apresentada na Figura 3.7.



(a) MONTAGEM DA JUNTA



(b) CONFINAMENTO COM CCR

FIGURA 3.7 – JUNTA DE CONTRAÇÃO COM MANTA NÃO ADERENTE (MARQUES FILHO, 2005)

Outras soluções consideram o corte mecânico da junta com equipamento vibratório, logo após a compactação, conforme apresentado na Figura 3.8, durante a construção da barragem de Miel I, na Colômbia. Destaca-se que a junta pode ainda receber chapas de aço após o corte para evitar seu fechamento, como ocorre no processo de construção RCD, no Japão (NAGAYAMA e JIKAN, 2003; NAGATAKI, FUJISAWA e KAWASAKI, 2008).

Qualquer que seja a técnica escolhida pode-se considerar junta ao longo de toda a extensão da seção transversal, ou junta induzida, criada em parte da seção tendo sua abertura completada pelos efeitos de retração térmica do concreto (MARQUES FILHO, 2005).





(a) DETALHE DO EQUIPAMENTO



(b) DETAHE DO CORTE

FIGURA 3.8 – CORTE MECÂNICO DA JUNTA COM EQUIPAMENTO VIBRATÓRIO (NAGATAKI, FUJISAWA e KAWASAKI, 2008)

### 3.1.7. Execução da Face de Montante

Geralmente, adota-se como solução para a face de montante, o emprego de materiais com permeabilidade controlada, a fim de garantir a estanqueidade e durabilidade do maciço.

Entre os principais métodos destacam-se:

- Aplicação de membranas impermeáveis a montante, utilizando placas de PVC, geomembranas de PVC, placas pré-moldadas com material asfáltico, e placas de aço (ANGULO et. al., 1995; ANDRIOLO e SCHIMIDT, 1992; PACELLI DE ANDRADE e ANDRIOLO, 1996).
- Execução de concreto convencional com limitação do coeficiente de permeabilidade.

Nesse caso, segundo Marques Filho (2005), cria-se uma interface entre materiais com comportamento diferentes sob o ponto de vista mecânico ao longo do tempo e relativo a variações de volume, com possibilidade de abertura de fissuras.

O processo prevê a colocação do concreto convencional na face de montante e espalhamento do CCR até a justaposição com o mesmo, realizando-se então a vibração manual do CCV para garantir o adensamento na região de transição. O concreto de face também pode ser colocado após o

espalhamento do CCR, através do uso de formas deslizantes (KUPERMAN, 1996; HANSEN e REINHARDT, 1991).

As Figuras 3.9 e 3.10 mostram a aplicação de CCV na face da barragem de Mauá, e detalhamento esquemático do processo, que pela imagem resultante, é largamente conhecido como método da “árvore de Natal”.

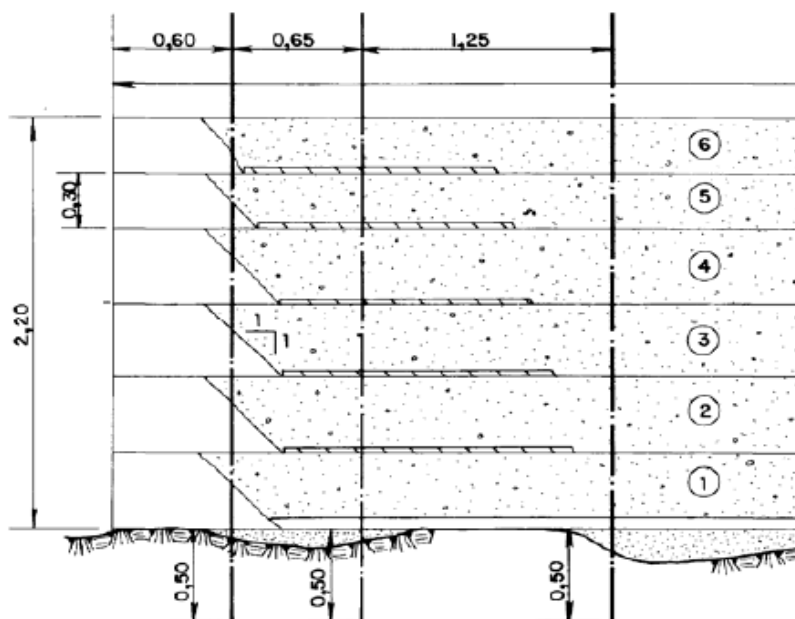


FIGURA 3.9 – DETALHE DO PROCESSO DA ÁRVORE DE NATAL



FIGURA 3.10 – EXECUÇÃO DA FACE DE MONTANTE COM CCV NA BARRAGEM DE MAUÁ

- Utilização de CCR com menor permeabilidade à montante, solução que vem sendo aplicada com grande frequência principalmente na Espanha e na China, com o conceito de CCR com alto teor de pasta, ou seja, consumos expressivos de aglomerante.

Na Espanha, é aplicada de duas formas: por zoneamento de CCR, com espessura mínima de 3,0 m, menores dimensões características máximas dos agregados para minimizar a segregação, e consumos ligeiramente maiores de aglomerante; ou execução de barragens homogêneas, com um só tipo de CCR menos permeável (ALONSO-FRANCO e JOFRÉ, 2003).

Na China, além dos métodos citados, vem se desenvolvendo a prática de aplicação de pasta ou argamassa sobre o CCR base e posterior compactação com vibradores de imersão. O processo foi denominado de enriquecimento com calda do CCR, ou *Grout Enrichment of RCC*, e visa a melhoria das condições de permeabilidade e resistência mecânica nas faces ou em regiões onde o acabamento pode ser importante (a abordagem com mais detalhes será vista no item 3.3.2.) (FORBES, 1999).

### 3.1.8. Demais Interferências

A garantia da produtividade na execução de barragens de CCR depende da praça livre para o uso dos equipamentos com o máximo rendimento. No entanto, o processo está sujeito a uma série de interferências executivas, que podem dificultar a compactação e comprometer as propriedades mecânicas do material nessas regiões, destacando: drenos e galerias de drenagem, cortinas de drenagem, cortinas de injeção, colocação de instrumentação, execução da face de montante, juntas de contração, e juntas de construção.

Para minimizar as interferências, galerias e concretos de peças hidráulicas podem adotar soluções com concreto pré-moldado, preenchimento e posterior remoção de material granular, ou ainda formas convencionais (KUPERMAN, 1996).

Na barragem de Capanda, as galerias foram inicialmente executadas através de enchimento com brita e cobertura com placas pré-moldadas, conforme mostrado na Figura 3.11. Porém, após a remoção do material as paredes apresentaram aspecto desagradável, motivo pelo qual se optou pela utilização de elementos pré-moldados na montagem das demais galerias.



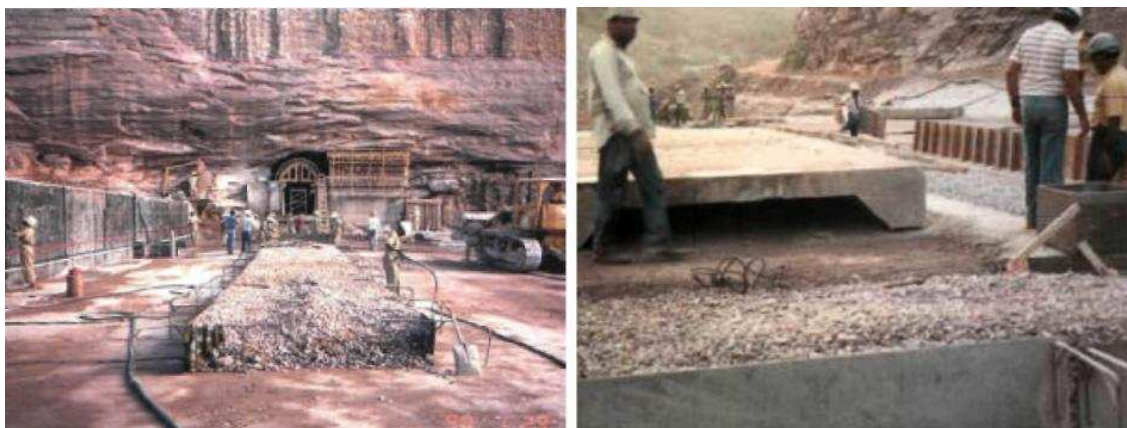


FIGURA 3.11 – GALERIAS COM ENCHIMENTO COM BRITA EM CAPANDA (RESENDE, 2005)

Juntas de construção podem exigir a aplicação de concreto convencional ou alterações na composição do CCR, aumentando o teor de pasta na mistura (MARQUES FILHO, 2005). Similarmente aos cuidados de construção da face de montante, a jusante pode ser necessários cuidados com a durabilidade, estéticos e, no caso de barragens com vertedouro, resistência à abrasão e à cavitação.

### 3.2. CONTROLE DE QUALIDADE

Semelhante ao processo de dosagem, o controle de qualidade na execução de barragens de CCR baseia-se em um plano de ensaios confiável para a avaliação dos parâmetros do material.

A amostragem usual considera a confecção de dois corpos de prova para cada idade de controle e para cada parâmetro por volume colocado entre 200 m<sup>3</sup> e 1000 m<sup>3</sup>, sendo comum amostras a cada 500 m<sup>3</sup> ou no mínimo uma amostra por turno de trabalho (ANDRIOLO, 1998). Também, costuma-se efetuar campanhas de extração de testemunhos com a finalidade de confirmar os resultados obtidos nos corpos de prova moldados (RESENDE, 2005).

A extração de testemunhos e sua usinagem, no entanto, requer atenção especial quanto à interpretação dos resultados, pois o processo pode causar traumatismos nos testemunhos através de pré-fissuramento. O corte aplica tensões laterais nas partículas dos agregados, devido ao atrito ao longo da superfície de corte, cujos esforços são transmitidos à zona de transição do concreto. Ocorre então a possibilidade de fissuração e decréscimo da resistência (MARQUES FILHO, TRABOULSI e PAULON, 2004).

Para um mesmo CCR, utilizado na execução da UHE Dona Francisca, testemunhos extraídos de maciços de laboratório apresentaram valores de resistência à compressão cerca de 30% menores que os corpos de prova moldados no controle da obra (Ibid).

Destaca-se que no desenvolvimento de CCR com alto teor de finos, com consumo de aglomerante relativamente baixo e dimensão máxima característica do agregado gráudo maior que nos concretos convencionais, a zona de transição do material apresenta-se bastante frágil nas primeiras idades. Logo, Marques Filho (2005), baseado em experiências anteriores, recomenda que o início do processo de sondagem no CCR deve aguardar entre 90 e 120 dias para se evitar danos significativos nos testemunhos.

Entre algumas medidas de controle no processo, tem-se:

- Controle do teor de cimento na mistura, feito por análise química ou por ensaio de determinação do calor de neutralização;
- Controle da granulometria através do peneiramento do concreto fresco;
- Controle do teor de umidade nas centrais misturadoras através do aparelho DMA, medindo-se a água unitária e massa unitária do CCR no estado fresco;
- Verificação da densidade final das camadas após o adensamento, realizada com o densímetro nuclear (Figura 3.12), e do grau de compactação.



FIGURA 3.12 – DETALHE DO DENSÍMETRO NUCLEAR (TRABOULSI, 2007)

Na construção das barragens Derivação do Rio Jordão e Salto Caxias, o controle do grau de compactação foi fundamental na tomada de decisão para melhoria da homogeneidade das camadas. Enquanto na primeira foram adotadas camadas com 0,40 m e teor de cimento de 75 kg/m<sup>3</sup>, obtendo-se 95% de grau de compactação, na segunda, optou-se por camadas com 0,30 m e CCR com maior trabalhabilidade, utilizando-se teor de cimento da ordem de 100 kg/m<sup>3</sup> com aditivos plastificantes, melhorando a compactação final das camadas (OLIVEIRA, MUSSI e MOSER, 2005).

Segundo Marques Filho (2005), as condições de contorno ambientais têm grande influência no teor de umidade do concreto, pois durante os processos de transporte e lançamento existem perdas que podem ser maiores ou menores dependendo da umidade do ar, da temperatura ambiente, da insolação e do vento. Em regiões com grandes variações climáticas diárias, como no Sul do Brasil, as condições de alterações na mistura se agravam, levando a maiores cuidados com a compactação e eficiência do processo.

Correções na mistura com o emprego de aditivos plastificantes, além de adequarem eventuais desvios na consistência do concreto por perda de umidade, permitem, em alguns casos, a redução do consumo de aglomerante (MOSER, MUSSI e ANDRIOLO, 1998).

### 3.3. INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS - O MÉTODO CHINÊS

#### 3.3.1. CCR Rampado

O método foi lançado inicialmente na China, em 1999, no Simpósio Internacional de Barragens de CCR, sob a denominação de *Horizontally Advancing Sloped Layers Construction of RCC* (HASLC), após aplicação com sucesso na barragem de Jiangya, na China, entre 1997 e 1999. No Brasil, teve sua primeira aplicação na barragem de Lajeado, em 2001, onde foram colocados 20.000 m<sup>3</sup> de concreto em uma estrutura provisória (FORBES, 2003).

O CCR rampado consiste na execução de camadas com altura entre 0,30 e 0,35 m, dispostas em rampa com inclinação variando de 7 a 10%, o que resulta em um tempo de exposição pequeno (máximo quatro horas) tornando desnecessário o emprego de argamassa de ligação entre camadas (BATISTA et al., 2002).

Em função do tempo de pega do concreto, da taxa de colocação do CCR e características das camadas e da praça, pode-se determinar a inclinação da rampa tal que seja dispensado o uso de argamassa de ligação, ou seja, dentro do tempo de pega da camada anterior, conforme pode ser observado na Figura 3.13 e equação 3.1.

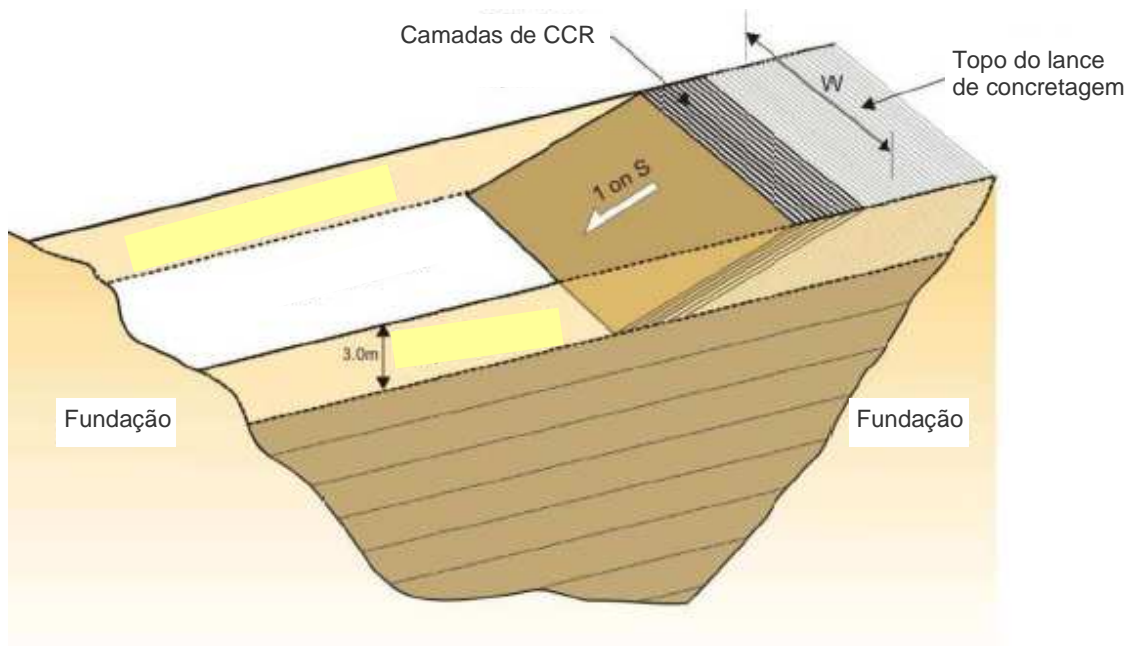


FIGURA 3.13 – PERSPECTIVA DO MÉTODO RAMPADO (FORBES, 2003)

$$S = \frac{t.P}{W.e.L} \quad (3.1)$$

Onde:

$1/S$  = Inclinação da rampa;

$t$  = Tempo de pega do concreto (h);

$P$  = Taxa de colocação do CCR ( $m^3/h$ );

$W$  = Largura da praça (m);

$L$  = Altura do lance de concretagem (m);

$e$  = Espessura das camadas (m).

Rampas mais suaves tendem a se aproximar da forma de lançamento horizontal, exigindo maior produtividade para evitar as juntas frias, porém facilitam a execução de juntas de contração e concretos de face. Em contrapartida, rampas acentuadas e curtas exigem menor produtividade do CCR, mas apresenta dificuldades na compactação, confecção de juntas de dilatação e execução de concretos de face (RESENDE, 2005).

A Figura 3.14 mostra a execução do CCR rampado na barragem de Lajeado, em que a inclinação da rampa foi marcada na própria forma, e a Figura 3.15 ilustra o método, com destaque para a necessidade de argamassa de ligação apenas entre lances de concretagem.



FIGURA 3.14 – EXECUÇÃO DO CCR RAMPADO EM LAJEADO (BATISTA ET AL., 2001)

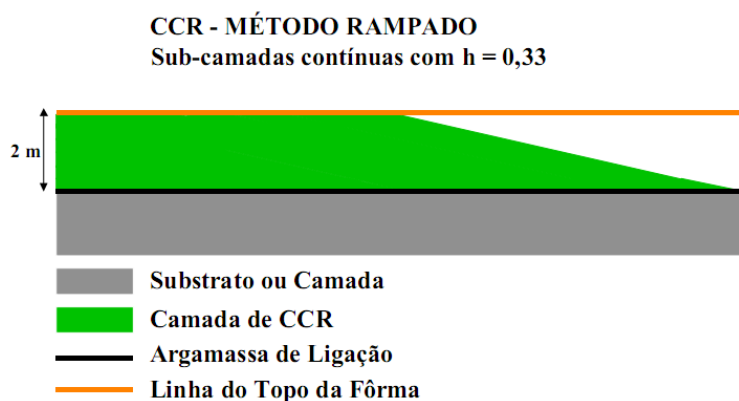


FIGURA 3.15 – ESQUEMA DO MÉTODO RAMPADO (BATISTA ET AL., 2002)

Outras características dizem respeito à antecipação do alteamento de formas, que pode ocorrer independente da conclusão total do lance de concretagem, e à aplicação do CCV de face em rampa, que pode ser executado acompanhando a geometria da mesma, mas com cuidados quanto à revibração devido ao fenômeno da retração plástica (BATISTA et al., 2002; BATISTA et al., 2001).

A Figura 3.16 apresenta um comparativo de produtividades e custos entre o método tradicional horizontal (cor verde) e o método rampado (cor vermelha), ambos executados na UHE Lajeado.

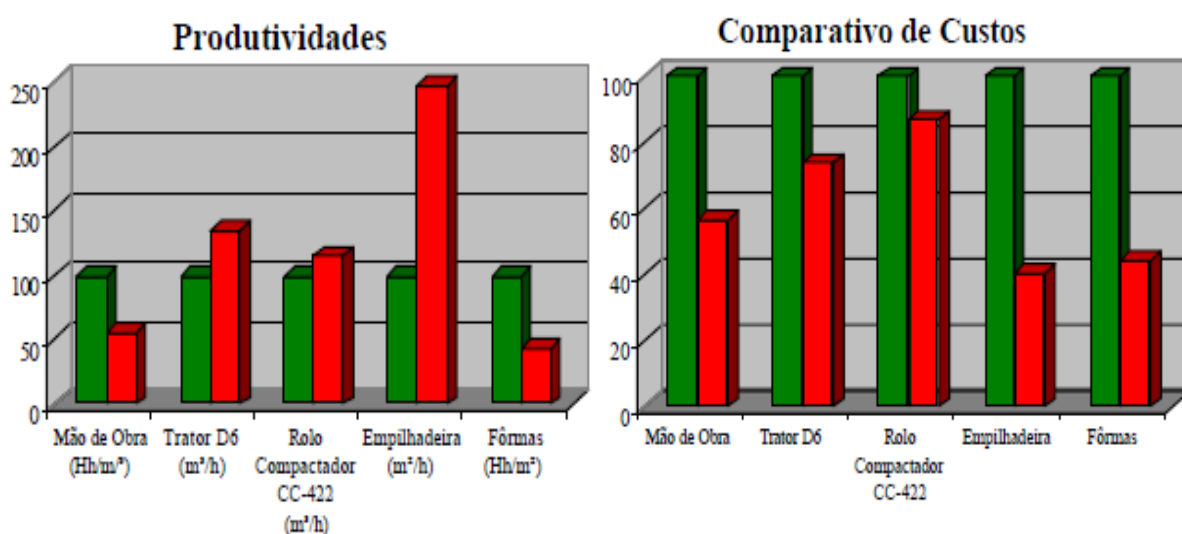


FIGURA 3.16 – COMPARATIVO DE PRODUTIVIDADES E CUSTOS ENTRE MÉTODOS (BATISTA ET AL., 2002)

Analisando a Figura acima, tomando-se como referência os resultados do método tradicional, observa-se um ganho de produtividade na operação dos equipamentos, principalmente da empilhadeira no alteamento de formas.

Sob o aspecto econômico, todos os fatores mostraram-se vantajosos a favor do método rampado, gerando economia de até 60% no caso de atividades relacionadas com a montagem de formas, devido à possibilidade de antecipação do alteamento das mesmas durante o processo de lançamento do CCR.

Segundo Forbes (2003) o método rampado apresenta as seguintes vantagens em relação ao método horizontal:

- Aumento da taxa de colocação do CCR, entre 30 e 50%;
- Redução de tratamento e limpeza de juntas e aplicação de argamassa de ligação, cerca de 90%;
- Não há necessidade de preparo e limpeza do CCR enriquecido quando esse for empregado na face de montante, pois permite o adensamento por vibradores no seu estado fresco;
- Redução da superfície de CCR exposta, minimizando custos com procedimentos de cura e danos ao concreto fresco decorrente de ações ambientais;

O mesmo autor cita as seguintes desvantagens:

- Limitação das soluções para formas de jusante, requerendo degraus com altura próxima ao do lance de concretagem para que o método seja eficiente;
- Cuidados especiais com o início da rampa, que devido à pequena espessura e peso do rolo atuante, pode apresentar problemas quanto à integridade dos agregados;
- Necessidade de remoção do CCR não compactado no topo da camada.

### 3.3.2. CCR Enriquecido com calda

A primeira aplicação de CCR enriquecido com calda foi em 1987, em um teste na face de montante da barragem de Yantan Coffe, na China, sendo essa técnica denominada inicialmente de “concreto anômalo”. Na seqüência, a técnica foi empregada na barragem de Rongdi, com 53 m de altura, em 1989, em toda a face de montante, e na barragem em arco de Puding, com 75 m de altura, em 1992, nas faces de montante e jusante, ambas na China (FORBES, 1999).

Investigações posteriores, através de sondagens e testes com água pressurizada, indicaram não haver nenhuma percolação significativa pelo maciço de Puding, mostrando tratar-se de um material de excelente qualidade. A partir de então, todas as barragens de CCR na China adotaram essa técnica, com destaque para Fenhe II, com 88 m de altura, em 1998, e Jiangya, com 131 m de altura, em 1999 (Ibid).



O CCR enriquecido com calda também foi empregado em outros países, na execução das barragens de Cadiangullong na Austrália, Horseshoe Bend na Nova Zelândia, Beni Haroun na Argélia, e Kinta na Malásia (Figura 3.17) (Ibid).



FIGURA 3.17 – VISTA DA BARRAGEM DE KINTA EM EXECUÇÃO (FORBES, 2008)

No Brasil, teve sua primeira aplicação em 1998, em maciços experimentais de laboratório executados em FURNAS, e em parede lateral da galeria de drenagem da barragem Dona Francisca, no Rio Grande do Sul. Posteriormente, nessa mesma obra, o CCR enriquecido foi empregado na face de jusante, apresentando resultados estéticos adequados, mas com dificuldade de vibração e fechamento na parte superior da camada.

Denominado originalmente de enriquecimento com argamassa do CCR, ou *grout enrichment of RCC* (GERCC), o processo visa melhorar as condições de permeabilidade e de resistência mecânica das faces de montante ou em regiões onde o acabamento pode ser importante.

Nesta técnica é lançada uma quantidade limitada de calda de cimento ou argamassa junto ao CCR, calculada para garantir a obtenção de um material com alto grau de homogeneidade, espalhado na face de montante, sendo utilizados na seqüência vibradores convencionais para a compactação (BATISTA et al., 2002a).

Em alguns casos o processo é complementado pelo revestimento com argamassa na face de montante, com espessura da ordem de 5 mm, de modo a garantir a baixa permeabilidade (Ibid).

A Figura 3.18 mostra a aplicação do CCR enriquecido em pista experimental executada para estudos na barragem de Mauá, no interior do Paraná, em 2009, em



que foram utilizados vibradores de imersão com diâmetro de 140 mm e calda preparada manualmente.



(a) LANÇAMENTO DA CALDA



(b) ADENSAMENTO

FIGURA 3.18 – APLICAÇÃO DO CCR ENRIQUECIDO EM MAUÁ

Destaca-se que a pista experimental mostrada acima foi executada com o mesmo CCR e equipamentos empregados na barragem, sendo o enriquecimento feito com calda a/c 0,8 com 1% de aditivo plastificante, e quantidade de 20 l/m.

O aspecto final da superfície foi bastante satisfatório, indicando adequada homogeneidade da mistura, e o resultado de permeabilidade atendeu aos critérios de projeto para aquela obra, situando-se na faixa de  $10^{-9}$  cm/s.

Segundo FORBES (1999) o GERCC possui as seguintes vantagens:

- Acabamento final com alta qualidade;
- Durabilidade, impermeabilidade;
- Homogeneidade e monoliticidade com o CCR adjacente;
- Simplicidade na execução, pois requer um único sistema de transporte (o mesmo do CCR) e a calda de cimento pode ser preparada manualmente ou mecanicamente;
- Pode ser executada com elementos imersos no CCR base, como armaduras de ancoragem;
- Baixo custo.

Segundo o mesmo autor, possui as seguintes desvantagens:

- O CCR base deve ser do tipo médio ou alto teor de pasta e possuir trabalhabilidade razoável (vebe próximo de 20 s);
- O controle de qualidade depende de boa inspeção, e da sensibilidade por parte dos operários encarregados da aplicação da calda e da execução do adensamento;
- É necessário tratamento de juntas, como no concreto convencional;

A aplicação da calda pode ser por baixo da camada, por cima ou ambas as formas, ou até mesmo em conjunto com a camada de CCR, enquanto essa está sendo espalhada. A viscosidade deve ser tal que, quando aplicada por cima, a calda penetre facilmente no interior da camada de CCR solto, podendo-se empregar aditivos do tipo plastificantes ou incorporadores de ar, quando a relação água/cimento da calda for maior que 1,0 (FORBES, 2008).

A quantidade requerida pode ser determinada por ensaios de laboratório e de campo, sendo tipicamente cerca de 8 l / m / 0,40 m de largura para camada de 0,30 m de espessura, para CCR contendo de 160 a 180 kg/m<sup>3</sup> de material cimentício (FORBES, 1999).

Durante o processo de compactação do CCR com rolos de grandes dimensões, eventualmente esses podem avançar sobre a zona do CCR enriquecido, causando o deslocamento da calda excedente para a superfície. Nesse caso, deve-se reduzir a quantidade de calda para as próximas aplicações ou utilizar vibradores maiores (Ibid).

A dimensão dos vibradores escolhidos depende da dimensão máxima dos agregados, trabalhabilidade do CCR original e quantidade de pasta. Na barragem de Jiangya, na China, foi utilizado um conjunto de quatro vibradores com 150 mm de diâmetro fixado em uma lança móvel, inicialmente projetado para o concreto massa, conforme pode ser visto na Figura 3.19 (FORBES et al., 1999).



FIGURA 3.19 – ADENSAMENTO DO CCR ENRIQUECIDO NA BARRAGEM DE JIANGYA (FORBES, 2008)

O assentamento da camada de CCR e o aparecimento de pasta na superfície podem ser tomados como parâmetros de controle no processo de adensamento.

## 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1. UHE MAUÁ

A Usina Hidrelétrica Mauá localiza-se no Rio Tibagi, entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba. O empreendimento terá potência instalada de 361 MW (megawatts), sendo 350 MW na casa de força principal e 11 MW em uma casa de força complementar junto à barragem, com a finalidade de aproveitar a vazão remanescente mantida entre a barragem e o canal de fuga da usina principal (CRUZEIRO DO SUL, 2010).

A obra é composta por uma barragem de concreto compactado com rolo (CCR), com 745 m de comprimento na crista, 85 m de altura máxima e 635.000 m<sup>3</sup>, com vertedouro sobre a barragem. O circuito hidráulico, para conduzir a água do reservatório até a casa de força, compreende uma tomada de baixa pressão, túnel de adução com 1.922 m, câmara de carga, toma d'água de alta pressão e três túneis forçados no trecho final.

O barramento ficará na região do Salto Mauá, 600 m a montante da já existente Usina Presidente Vargas e permitirá a formação de um reservatório com quase 80 km de extensão e 84 km<sup>2</sup> de superfície. Possui os seguintes aspectos construtivos:

- Concreto lançado pelo método rampado, com previsão de aplicação de argamassa de ligação entre os lances de concretagem;
- Paramento de jusante escalonado em degraus com altura do lance de concretagem (2,40 m, composto por oito subcamadas de 0,30 m);
- Formas temporariamente fixas, movimentadas com a utilização de guindaste;
- Controle de percolação através da execução da face de montante em concreto convencional, e sistema de drenagem composto por drenos e galerias pré-moldadas de concreto;
- Juntas de contração a cada 20 m, executadas por corte mecânico logo após a compactação da camada de CCR.

A Figura 4.1 mostra um arranjo geral em planta da UHE Mauá, onde podem ser identificados os principais elementos, e a Figura 4.2 mostra uma vista de jusante da barragem em construção.

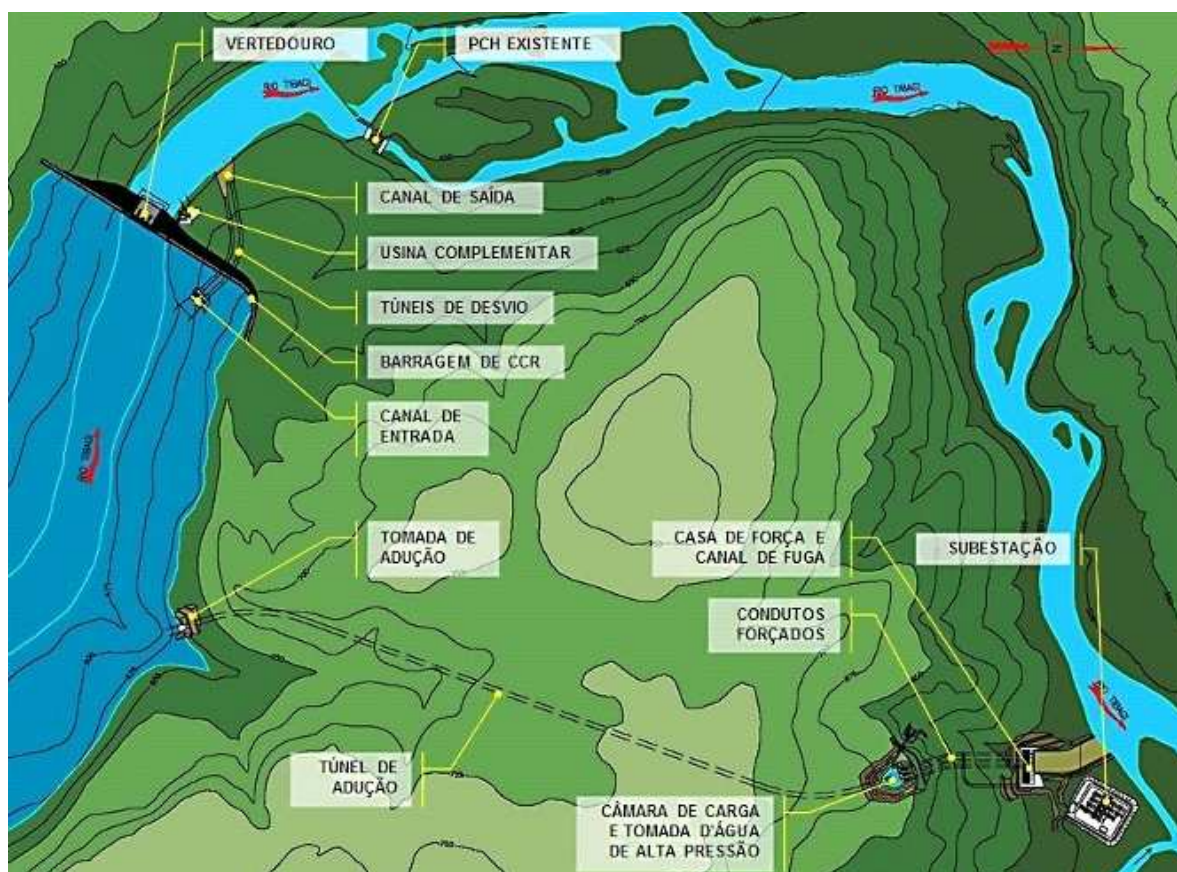


FIGURA 4.1 – ARRANJO GERAL DA UHE MAUÁ (CRUZEIRO DO SUL, 2010)



FIGURA 4.2 – VISTA DA BARRAGEM DE MAUÁ EM CONSTRUÇÃO

## 4.2. PROJETO DE EXPERIMENTOS

O estudo do CCR enriquecido com calda de cimento visa sua aplicação na face de barragens de concreto, em substituição ao concreto convencional. Portanto, para a estruturação de um projeto de experimentos adequado, é necessário inicialmente avaliar as características desejáveis do material em teste, bem como identificar as principais variabilidades envolvidas no processo.

Como variáveis de resposta do estudo, adotou-se a resistência mecânica e a permeabilidade, pois são parâmetros considerados no projeto de barragens devido a correlações que apresentam com a durabilidade e impermeabilidade do material, características desejáveis para a face de montante.

O processo do CCR enriquecido apresenta as seguintes variabilidades:

a) Variabilidades devido ao CCR

- Alterações na mistura, verificadas durante o controle da obra;
- Mudanças no teor de água ao longo do processo executivo;
- Tempo de espera entre o espalhamento do CCR base e a aplicação da calda.

b) Variabilidades devido ao adensamento

- Tipo do vibrador;
- Distância entre os pontos de inserção do vibrador;
- Tempo de vibração no interior da massa.

c) Variabilidades devido ao enriquecimento

- Traço e trabalhabilidade da calda;
- Quantidade de calda por metro linear aplicado;
- Uniformidade de aplicação da calda.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo de todos os fatores envolvidos na pesquisa, seus limites e classificação, sendo os fatores controláveis escolhidos em função dos recursos disponíveis (tempo de realização e custo dos ensaios pretendidos).

TABELA 4.1 – RESUMO DOS FATORES ENVOLVIDOS NA PESQUISA

FATORES	UNIDADE	LIMITES	TIPO
Consistência do CCR	s	8 - 15	constante
Cura do CCR enriquecido	-	-	constante
Diâmetro do vibrador	mm	90 - 140	constante
Distância de adensamento	mm	30 - 50	constante
Idade de controle	dias	28 - 90	constante
Tempo de vibração	s	10 - 30	constante
Tempo entre colocação do CCR e aplicação da calda	h	0 - 2	constante
Quantidade de calda por metro linear	l/m	15 - 20	controlável
Traço da calda	a/c	0,7 - 0,9	controlável
Permeabilidade	m/s	-	resposta
Resistência à compressão	Mpa	-	resposta
Resistência à tração	Mpa	-	resposta
Operação (m.o.)	-	-	ruído
Temperatura ambiente	°C	20 - 30	ruído
Temperatura dos materiais	°C	20 - 30	ruído

O modelo experimental proposto é do tipo fatorial cruzado com dois fatores controláveis, cuja utilização proporciona melhor economia e permite avaliar a interação dos fatores (RIBEIRO e TEM CATEN, 2001). Os níveis de controle escolhidos foram:

- Quantidade de calda (l/m): 15 / 17 / 19;
- Traço da calda (a/c): 0,7 / 0,8 / 0,9;
- Diâmetro do vibrador (mm): 140;
- Tempo de vibração por ponto (s): 15;
- Tempo entre colocação do CCR e aplicação da calda (h): 1.

O modelo estatístico utilizado é representado pela equação 4.1.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (4.1)$$

Onde:

$\mu$  = Média geral;

$\tau_i$  = Efeito do i-ésimo nível de A;

$\beta_j$  = Efeito do j-ésimo nível de B;



$(\tau\beta)_{ij}$  = Efeito da interação AB;

$\varepsilon_{ijk}$  = Erro aleatório.

Forbes (1999) avalia a quantidade de calda como sendo tipicamente de 8 l / m / 0,40 m de largura para camada de 0,30 m de espessura, para CCR contendo de 160 a 180 kg/m<sup>3</sup> de material cimentício. Também prevê a possibilidade de emprego de aditivos para traços com relações água/cimento elevadas.

Outra forma para escolha das variáveis da calda seria partir dos consumos de cimento usualmente praticados nos concretos de face no Brasil, entre 180 e 220 kg/m<sup>3</sup>, resultando resistências entre 12 e 15 MPa. A Figura 4.3 mostra uma simulação das combinações possíveis para atingir consumos de cimento, a partir do enriquecimento do CCR empregado na UHE Mauá.

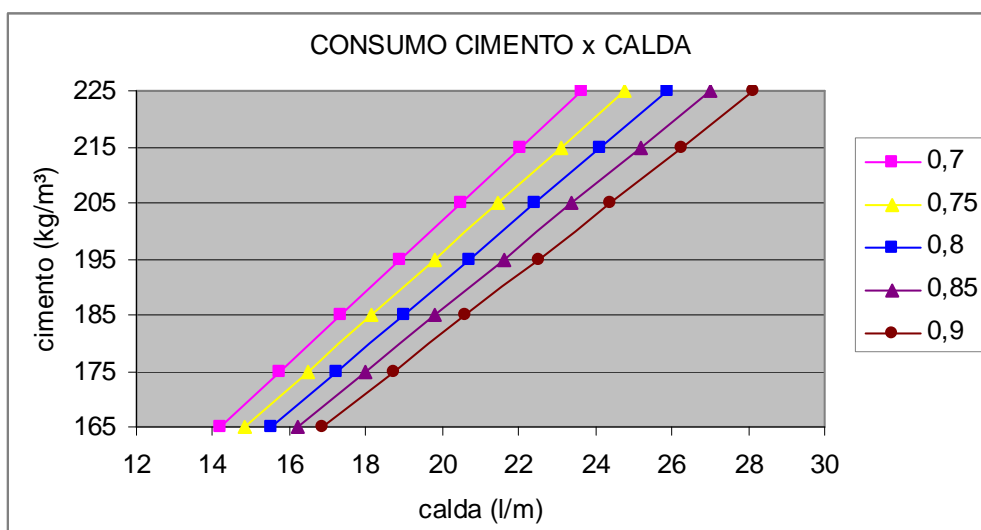


FIGURA 4.3 – COMBINAÇÕES DA CALDA PARA ENRIQUECIMENTO DO CCR - MAUÁ

Para atingir 195 kg/m<sup>3</sup>, que é o consumo do CCV de face utilizado em Mauá, seriam necessárias quantidades de calda entre 19 e 22 l/m aproximadamente, para os traços escolhidos. No entanto, decidiu-se por valores intermediários entre a simulação e a bibliografia, por questões econômicas, pretendendo-se testar soluções com melhor desempenho. Também, parte-se do pressuposto de que o CCR base, com alto teor de finos, apresenta bons resultados de permeabilidade, não sendo necessários volumes extremos de calda.



Para garantia da produtividade e qualidade do CCR é preciso total sincronia das atividades envolvidas. No entanto, desde a fabricação até o lançamento e compactação na praça, o concreto pode levar até 45 minutos (RESENDE, 2005), motivo pelo qual se adotou o tempo de 1 hora entre a colocação do CCR e aplicação da calda.

Inicialmente foram moldados dez prismas experimentais, sendo nove com combinações de calda possíveis e um executado em concreto convencional como referência, o mesmo empregado na face de montante da barragem. A fim de simular uma porção da face de montante, os prismas foram executados nas seguintes dimensões:

- 0,30 m (A), relativo à altura da camada de CCR na barragem;
- 0,60 m (B), relativo à profundidade do zoneamento da barragem no método da “árvore de natal”;
- 0,70 m (C), relativo à medida longitudinal ao eixo da barragem.

Após, foram extraídos quatro testemunhos de cada prisma para a realização dos ensaios mecânicos e de permeabilidade. A ASTM C 42 (2004) recomenda que a relação entre o diâmetro dos testemunhos e a dimensão máxima característica do agregado seja superior a três, devendo nesse caso, para CCR com DMC de 50 mm, adotar o diâmetro de 150 mm. Porém, devido a restrições físicas, três amostras foram extraídas com diâmetro de 100 mm.

Na Figura 4.4 pode-se observar com mais clareza as medidas dos prismas e posicionamento da furação dos testemunhos.

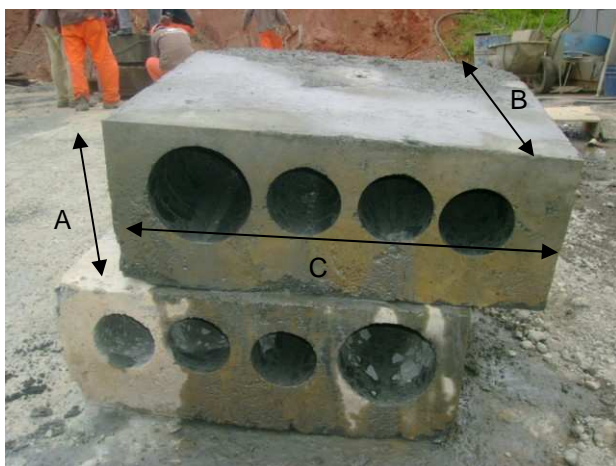


FIGURA 4.4 – DETALHE DAS DIMENSÕES DOS PRISMAS

A estratégia adotada justifica-se pela inexistência de procedimentos para moldagem de corpos de prova de CCR enriquecido, exigindo a moldagem de amostras com volumes maiores e posterior extração de testemunhos.

A execução de maciços experimentais de campo, nesse caso uma adaptação, possibilita a avaliação das condições e procedimentos reais de execução, utilizando equipamentos, materiais, central de produção e mão de obra diretamente envolvidos no empreendimento (MARQUES FILHO, TRABOULSI e PAULON, 2004).

Entre as características dos maciços de campo, tem-se:

- Avaliação dos processos de controle da qualidade e sua eficiência em condições reais do campo;
- Avaliação de perdas de consistência e teor de água entre a mistura e a colocação;
- Calibragem dos tempos de execução de cada etapa do processo;
- Treinamento das equipes de forma a minimizar os efeitos do noviciado nos primeiros lançamentos, fato particularmente importante no enriquecimento com calda. A execução do experimento fornece um balizamento para correções de procedimentos ou de treinamento das equipes, de modo a minimizar a probabilidade de não conformidades no início da obra;
- O treinamento, aliado ao controle e correção de processos, leva a minimização do índice de variação dos parâmetros controlados no início de obra;
- Obtenção de dados em testemunhos para calibrar os ensaios em corpos-de-prova moldados, complementando os ensaios e correlações obtidas durante os processos de dosagem.

A Tabela 4.2 apresenta um resumo para confecção dos prismas experimentais, com identificação das combinações e quantidade ajustada de calda, em função do comprimento inferior a 1,0 m.

TABELA 4.2 – RESUMO DOS PRISMAS EXPERIMENTAIS

FATORES	PRISMAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Quantidade de calda (l/m)	15	17	19	15	17	19	15	17	19	
Quantidade ajustada (l)	10,5	12	13,5	10,5	12	13,5	10,5	12	13,5	CCV
Traço da calda (relação a/c)	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	

### 4.3. EQUIPAMENTOS

#### 4.3.1. Adensamento do CCR enriquecido

Para o adensamento do CCR enriquecido utilizou-se vibrador de imersão com acionamento pneumático, modelo NR 140. Apesar de relativamente desconfortável para o operador, devido ao grande peso, e aparentemente superdimensionado para o volume dos prismas experimentais, sua utilização justifica-se pela intenção inicial de aplicação do CCR enriquecido na própria barragem.

Com motor pneumático de elevado desempenho, o equipamento é indicado para obras civis de grande porte, e elimina o risco de choque elétrico. As principais características técnicas são apresentadas na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO VIBRADOR DE IMERSÃO NR 140

Capacidade (m³/h)	63
Comprimento (mm)	1200
Comprimento da agulha (mm)	495
Consumo de ar (l/s)	38
Diâmetro da agulha (mm)	140
Mangueira de alimentação (mm)	19
Peso (kg)	33
Rotação (rpm)	8000

FONTE: FABRICANTE, 2009

A Figura 4.5 mostra o grau de dificuldade na operação desse equipamento, sendo necessários dois operários para posicioná-lo sobre o primeiro prisma, para adensamento do CCV de referência.



FIGURA 4.5 – VIBRADOR DE IMERSÃO NR 140

#### 4.3.2. Extração de testemunhos

Apesar dos efeitos indesejáveis na obtenção de testemunhos, decorrentes do pré-fissuramento, o processo fornece amostras de concreto com tensões de confinamento laterais realmente desenvolvidas no material.

No controle de obras de barragens, a extração fica limitada às condições físicas de execução do ensaio, e necessidade do CCR de possuir uma resistência mínima para garantia da confiabilidade dos resultados. No entanto, em prismas experimentais a extração de testemunhos é mais simples, pela facilidade de manuseio da peça e inexistência de limitações geométricas (MARQUES FILHO, 2005).

A extração de testemunhos para o estudo proposto foi realizada com perfuratriz elétrica HILTI DD 200, cujo motor possui potência de 2600 W e velocidade de perfuração de 550 rotações por minuto. Trata-se de um equipamento bastante versátil, com possibilidade de furação com diversas inclinações e diâmetros, e facilidade de manuseio.

A Figura 4.6 mostra a perfuratriz montada sobre base de concreto para extração dos testemunhos do programa experimental, em Mauá, onde se podem observar as coroas diamantadas utilizadas, com diâmetros de 100 mm e 150 mm.



FIGURA 4.6 – PERFURATRIZ HILTI DD 200

#### 4.4. MATERIAIS E DOSAGENS

Para a realização do estudo optou-se pela utilização dos mesmos materiais e dosagens empregados na obra, devido à facilidade de obtenção e proximidade das condições reais de execução, obtendo resultados mais significativos.

##### 4.4.1. Calda de cimento

A calda de cimento foi confeccionada com o cimento CPIV RS da Votorantim e aditivo retardador de pega PLASTIMENT VZ da Sika Brasil, nos traços definidos conforme programa experimental.

As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam dados de caracterização do cimento e aditivo fornecidos pelo fabricante, correspondente ao período de realização da pesquisa.

TABELA 4.4 – CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO

Características Químicas	
Equivalente alcalino - K <sub>2</sub> O (%)	1,3
Equivalente alcalino - Na <sub>2</sub> O (%)	0,18
Perda ao fogo (%)	3,45
Óxido de silício - SiO <sub>2</sub> (%)	28,6
Óxido de cálcio - CaO (%)	43,79
Óxido de magnésio - MgO (%)	5,14
Óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,79
Óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	9,72
Anidrido sulfúrico – SO <sub>3</sub> (%)	2,1
Anidrido carbônico – CO <sub>2</sub> (%)	2,64
Resíduo insolúvel – RI (%)	25,3
Características Físicas	
Área específica - Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4417
Resíduo # 200 (%)	0,54
Resíduo # 325 (%)	3,45
Água pasta de consistência normal (%)	28,77
Início de pega (min.)	224
Fim de pega (min.)	299
Características Mecânicas	
Resistência à compressão - 1 dia (Mpa)	15,49
Resistência à compressão - 3 dias (Mpa)	25,73
Resistência à compressão - 7 dias (Mpa)	30,36
Resistência à compressão - 28 dias (Mpa)	42,49

FONTE: VOTORANTIM CIMENTOS, 2009

TABELA 4.5 – CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO

PARÂMETROS	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS
Aspecto	PTL-001	Líquido amarelo	Satisfatório
Densidade (g/ml)	PTL-004 A	1,10 - 1,14	1,12
PH	PTL-028	4,5 - 6,5	4,7
Sólidos (%)	PTL-080	27 - 31	27,2

FONTE: SIKA BRASIL, 2009

#### 4.4.2. CCR e CCV de face

Na Tabela 4.6 pode-se observar a composição dos traços dos concretos utilizados, ambos obtidos diretamente da central misturadora da obra.

TABELA 4.6 – DOSAGEM DOS CONCRETOS EMPREGADOS

MISTURAS / MATERIAIS		CONCRETO	
		CCR	CCV face
Cimento	(kg/m <sup>3</sup> )	75	195
Água	(kg/m <sup>3</sup> )	125	190
Areia artificial	(kg/m <sup>3</sup> )	1272	1144
Brita 25 mm	(kg/m <sup>3</sup> )	619	1018
Brita 50 mm	(kg/m <sup>3</sup> )	619	-
Relação a/c		1,67	0,97
Plastificante	(l/m <sup>3</sup> )	0,9	1,32
Slump	(mm)	-	70 ± 10
Vebê	(s)	15 ± 5	-
Ar incorporado	(%)	-	1,0 ± 0,5
Densidade teórica	(kg/m <sup>3</sup> )	2710	2547
fck	(Mpa)	7	12
Idade de controle	(dias)	180	180
Confiança estatística	(%)	80	80
Dim. Máxima caract.	(mm)	50	25

As misturas são caracterizadas no seu estado fresco pela consistência e densidade teórica, e no estado endurecido pela resistência característica à compressão com idade de controle de 180 dias. Ambas utilizam areia artificial de agregado britado na sua composição.

#### 4.5. PROCEDIMENTOS

##### 4.5.1. Moldagem dos prismas experimentais

A moldagem dos prismas experimentais foi realizada em uma área adjacente ao laboratório de controle da obra, situado anexo à central misturadora. Inicialmente, foi moldada a peça correspondente ao concreto convencional, sendo o material transportado e lançado diretamente do caminhão betoneira, conforme pode ser visto na Figura 4.7.



(a) LANÇAMENTO DO CAMINHÃO



(b) ASPECTO FINAL

FIGURA 4.7 – MOLDAGEM DO CCV DE REFERÊNCIA

Para o adensamento utilizou-se o mesmo vibrador empregado no CCR enriquecido, vibrando a mistura em um único ponto e tomando como parâmetro de controle para o tempo de imersão, o assentamento da camada e o aparecimento de argamassa na superfície.

O CCR foi transportado da central através de pá carregadeira, onde era depositado sobre um filme plástico para posterior colocação nas formas. O material era coletado manualmente do interior da massa, evitando-se coletar o CCR da superfície, e então depositado nas caixas, as quais foram molhadas previamente. Por fim, procedeu-se a remoção de cerca de 2 cm do CCR superficial com a finalidade de evitar o transbordamento da calda, em um primeiro momento, quando da sua aplicação.

A seqüência das operações de colocação do CCR nas formas pode ser observada na Figura 4.8.





(a) TRANSPORTE DO CCR



(b) COLETA DA PILHA



(c) REMOÇÃO DA CAMADA SUPERFICIAL

FIGURA 4.8 – COLOCAÇÃO DO CCR NAS FORMAS

Decorrida uma hora da fabricação do CCR, passou-se para a fase de enriquecimento com calda. Essa foi preparada (homogeneizada) em um tambor adaptado com pás misturadoras e torneira para coleta. Os volumes necessários ao programa experimental foram medidos em balde graduado, com o qual foi feita a aplicação manual da calda, conforme observado na Figura 4.9.



FIGURA 4.9 – DETALHE DO PREPARO DA CALDA

Imediatamente após a colocação da calda foi realizado o adensamento em dois pontos de vibração distribuídos igualmente na superfície, marcando-se o tempo necessário. Destaca-se a utilização de um gabarito para delimitar a área de espalhamento da calda, através de uma ripa com 0,10 m de largura e comprimento igual do prisma colocada na face correspondente à jusante (Figura 4.10 a).

O aspecto superficial pós-vibração apresentou marcas nos pontos de vibração e falta de homogeneidade na face de jusante, cuja visualização era esperada e explica a adoção do gabarito citado.

A Figura 4.10 mostra a seqüência do processo de enriquecimento e o aspecto final da superfície enriquecida, sendo a falta de homogeneidade mais perceptível quanto menor a relação água/cimento empregada na composição da calda.

O processo de cura dos prismas foi realizado durante 14 dias, o mesmo tempo utilizado na barragem de CCR, mantendo uma película de água sobre a superfície através da molhagem do concreto com o uso de mangueira, conforme pode ser visto na Figura 4.11.



(a) APLICAÇÃO DA CALDA



(b) ADENSAMENTO



(c) ASPECTO SUPERFICIAL (a/c 0,74)



(d) ASPECTO SUPERFICIAL (a/c 0,9)

FIGURA 4.10 – PROCESSO DE ENRIQUECIMENTO DO CCR



FIGURA 4.11 – CURA DO CCR ENRIQUECIDO



#### 4.5.2. Ensaios de campo – Caldas e concretos

Durante o tempo de espera entre a colocação do CCR e aplicação da calda, foram realizados ensaios de controle do CCR fresco, a fim de balizar os resultados obtidos, e ensaio de fluidez das caldas empregadas.

Os parâmetros medidos do CCR fresco foram a temperatura, e massa unitária (aparente) e *cannon time* através do ensaio de vebê modificado, conforme descrito anteriormente no item 2.5.1.

O ensaio de fluidez, também conhecido como ensaio do “Cone de Marsh”, foi realizado conforme NBR 7682 (ABNT, 1983), com o objetivo de verificar a fluidez mínima que garanta a penetração da calda, de acordo com observações anteriores. A Figura 4.12, mostra a determinação do índice de fluidez que consiste no tempo necessário para um fluído colocado dentro de um funil padronizado preencher um recipiente com volume de 1l.



(a) PREPARO DO FUNIL



(b) EXECUÇÃO DO ENSAIO

FIGURA 4.12 – ENSAIO DO CONE DE MARSH

#### 4.5.3. Extração dos testemunhos

A extração dos testemunhos foi realizada aos 53 dias de idade, por razões de cronograma. O procedimento consistiu na desforma, posicionamento dos prismas para furação e identificação das amostras após a retirada. A Figura 4.13 mostra a seqüência de realização do ensaio desde o posicionamento dos prismas, realizado manualmente, até a retirada das amostras.



(a) POSICIONAMENTO DO PRISMA



(b) FIXAÇÃO COM CORDA



(c) MARCAÇÃO DA FURAÇÃO



(d) EXECUÇÃO DO CORTE



(e) RETIRADA DO TESTEMUNHO

FIGURA 4.13 – PROCEDIMENTO DE EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS

Destaca-se que após desformados, os prismas apresentaram um padrão visual quanto à homogeneidade, havendo maior heterogeneidade à jusante, no fundo da peça e fora dos pontos de vibração, conforme Figura 4.14.

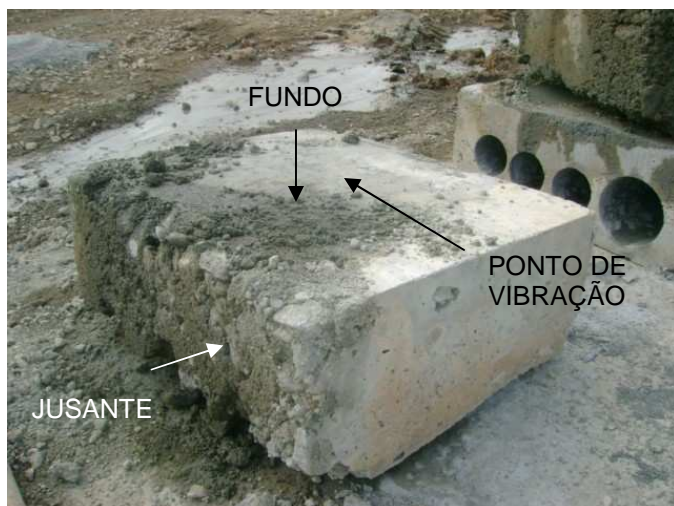


FIGURA 4.14 – DETALHE DO ASPECTO DOS PRISMAS APÓS DESFORMA

A identificação das amostras foi realizada com o uso de marcador industrial, sendo nomeadas conforme o número do prisma correspondente, referente à certa combinação de fatores da calda, e o tipo de ensaio a qual eram submetidos, de acordo com o exemplo abaixo:

- 5 P, amostra do prisma 5 submetido ao ensaio de permeabilidade;
- 5 T, amostra do prisma 5 submetido ao ensaio de tração;
- 5 C 1, primeira amostra do prisma 5 submetido ao ensaio de compressão;
- 5 C 2, segunda amostra do prisma 5 submetido ao ensaio de compressão.

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram, respectivamente, detalhe da identificação dos testemunhos e uma visão geral após extração de todos os cilindros.

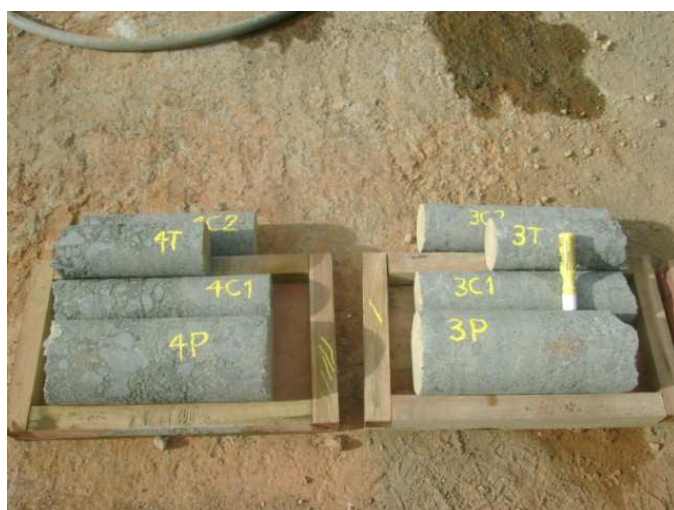


FIGURA 4.15 – DETALHE DA IDENTIFICAÇÃO DOS TESTEMUNHOS





FIGURA 4.16 – VISÃO GERAL DOS TESTEMUNHOS

#### 4.5.4. Ensaios mecânicos e de permeabilidade

Os testemunhos foram enviados para o Laboratório de Materiais e Estruturas, LAME, em Curitiba, para realização dos ensaios de resistência mecânica e de permeabilidade. Inicialmente, os cilindros foram usinados nas dimensões preconizadas por norma, com o uso de serra diamantada, como se pode observar na Figura 4.17.



(a) POSICIONAMENTO PARA CORTE



(b) EXECUÇÃO DO CORTE

FIGURA 4.17 – USINAGEM DOS TESTEMUNHOS

Os corpos de prova resultantes, com dimensões (10 x 20) cm, foram ensaiados à resistência à compressão conforme estabelecido pela NBR 5739 (ABNT, 2007), e à resistência à tração por compressão diametral conforme descrito

pela NBR 7222 (ABNT, 1994). Para tanto, utilizou-se prensa automatizada, marca EMIC, modelo DL 30.000 para 30 tf (Figura 4.18).



FIGURA 4.18 – PRENSA UTILIZADA NOS ENSAIOS MECÂNICOS

As Figuras 4.19 e 4.20 mostram detalhes dos ensaios mecânicos executados. Destaca-se que o ensaio de tração por compressão diametral consiste em um método indireto para determinação da resistência à tração, mediante a aplicação de uma tensão de compressão na geratriz do cilindro, sendo adaptadas chapas metálicas à prensa.



(a) CORPOS DE PROVA CAPEADOS



(b) EXECUÇÃO DO ENSAIO

FIGURA 4.19 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO





(a) EXECUÇÃO DO ENSAIO

(b) DETALHE DO ROMPIMENTO

FIGURA 4.20 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os corpos de prova com dimensões (15 x 15) cm foram ensaiados à permeabilidade de acordo com a NBR 10786 (ABNT, 1989), em equipamento similar ao desenvolvido pelo *United States Bureau of Reclamation*, cujo esquema pode ser visto na Figura 4.21.

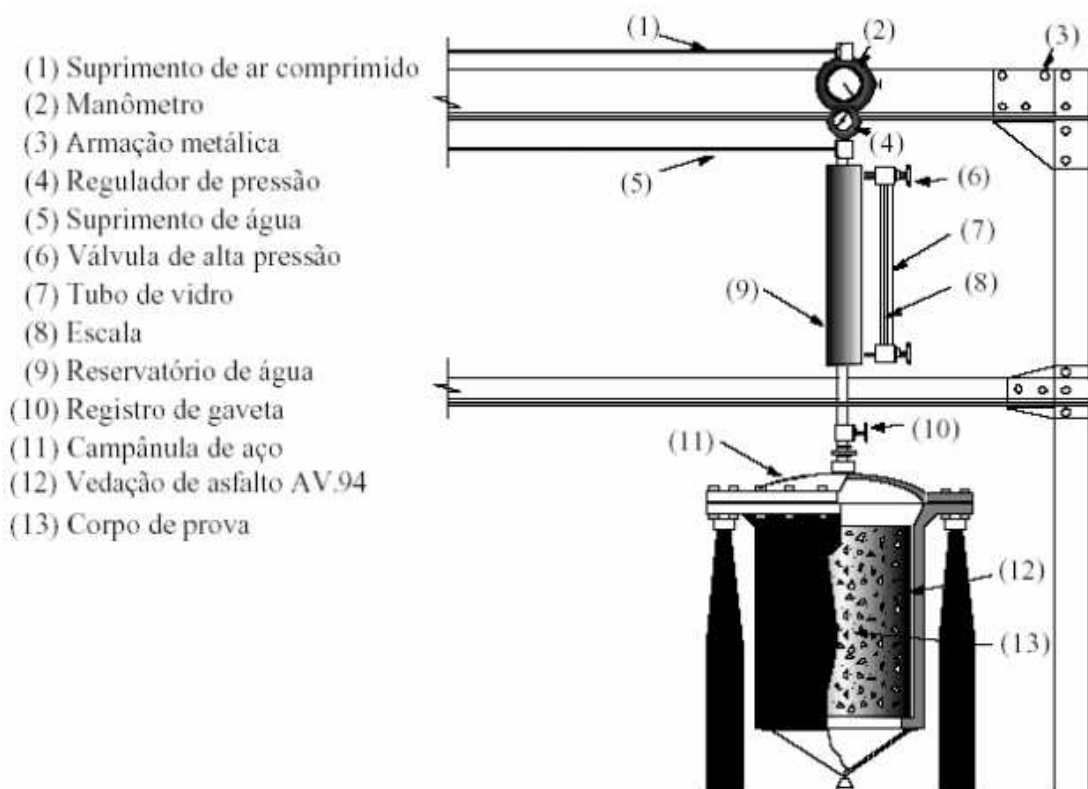


FIGURA 4.21 – ESQUEMA DO EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE PERMEABILIDADE

O desenvolvimento do ensaio de permeabilidade pode ser visto na Figura 4.22, sendo executadas ao mesmo tempo as dez amostras previstas pelo programa experimental, por questões de cronograma, independente do volume dos tanques disponíveis no equipamento.

Usualmente costuma-se ensaiar concretos com maior porosidade, como por exemplo, o CCR, em tanques com maior volume, pois requerem um maior volume de água percolada para um dado intervalo de tempo. Além disso, o ensaio de permeabilidade apresenta um período de execução bastante longo (500 horas), exigindo que os tanques sejam completados periodicamente, de modo a evitar o seu esgotamento, o que poderia invalidar o resultado final do ensaio.

Devido a incertezas quanto às propriedades do CCR enriquecido, se esse apresentaria a mesma porosidade do concreto convencional, a realização do ensaio em tanques com volume reduzido poderia gerar perdas decorrentes de percolação excessiva nas amostras, o que não aconteceu.



(a) PREPARO DAS AMOSTRAS



(b) ENSAIO EM ANDAMENTO

FIGURA 4.22 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE

## 5. RESULTADOS E ANÁLISE

### 5.1. RESULTADOS DAS CALDAS E CONCRETOS

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos ensaios de campo realizados durante a execução dos prismas experimentais, onde podem ser observados dados dos concretos no estado fresco, caldas e temperatura ambiente.

TABELA 5.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO

PARÂMETROS	PRISMAS			
	10 (CCV)	1 / 2 / 3	4 / 5 / 6	7 / 8 / 9
Temp. ambiente (°C)	29,8	31	24,3	24,3
Vebê (s)/ slump (cm)	5,5	10	10	12
M.U. (kg/m³)	2457	2611	2634	2608
Temp. concreto (°C)	31	32,5	29,5	29,5
relação a/c	-	0,74	0,8	0,9
aditivo (%)	-	1	1	1
fluidez (s)	-	6,7	6,1	5,7

Destaca-se que houve uma mudança em relação ao planejamento inicial, alterando-se a relação água/cimento da primeira calda de 0,7 para 0,74, em virtude de dificuldades de penetração da mesma. Essa foi testada com teores de aditivo de 1,0%, 1,2% e 1,6%, mas sem mudanças nos resultados de fluidez, os quais resultaram todos próximos e acima de sete segundos.

A fluidez insuficiente pode ser atribuída ao tipo de aditivo utilizado (retardador de pega) e seu comportamento em função da temperatura. Os ensaios da calda 0,7 foram realizados com temperaturas elevadas, fora dos limites especificados para o estudo, acima de 30°C, sendo repetidos com temperaturas menores durante a moldagem dos prismas 4 a 9, resultando fluidez de 7,1 segundos para calda sem aditivo e fluidez de 6,5 segundos para calda com 1,0% de aditivo.

A Figura 5.1 mostra a dificuldade de penetração da calda 0,7 com teor de aditivo de até 1,6%, misturada em temperatura ambiente de 31 °C, imediatamente após a aplicação.



FIGURA 5.1 - PENETRAÇÃO DA CALDA 0,74 MISTURADA A 31°C

As misturas de CCR empregadas apresentaram consistências dentro dos limites da pesquisa, confirmando a hipótese inicial quanto à possibilidade de penetração da calda, salvo as limitações relativas ao tipo do aditivo. Sua escolha justifica-se pela simplicidade de execução, sendo o mesmo aditivo utilizado no CCR da barragem. Não faz parte, portanto, dos objetivos da pesquisa o estudo específico da dosagem das caldas.

## 5.2. RESULTADOS DO CCR ENRIQUECIDO

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de laboratório dos testemunhos, sendo primeiramente analisada a interação das combinações da calda e após a comparação do CCR enriquecido com o CCV de referência.

A Tabela 5.2 mostra os resultados gerais de resistência mecânica para uma idade de 70 dias, e de permeabilidade para as diferentes combinações, havendo apenas um ensaio por tratamento para cada parâmetro investigado, exceto a resistência à compressão em que se trabalhou com dois ensaios.

Os resultados de permeabilidade referem-se aos 60 dias de idade, corrigido pelo fator de correção do *United States Bureau of Reclamation*. O relatório completo dos ensaios de laboratório, realizados pelo Laboratório de Materiais e Estruturas, LAME, contendo identificação das amostras, procedimentos utilizados e resultados, é apresentado no Anexo A.

TABELA 5.2 – RESULTADOS DO CCR ENRIQUECIDO

COMBINAÇÕES		RESIST.COMP.			RESIST.TRAÇÃO	PERMEAB.
DA CALDA		(Mpa)			(Mpa)	(cm/s)
		média	desvio	ensaios		
0,74	15	8,37	0,74	2	0,95	8,40E-09
	17	7,88	1,14	2	0,75	1,01E-08
	19	11,63	3,49	2	0,70	4,33E-09
0,8	15	7,28	1,93	2	1,10	3,25E-08
	17	7,65	2,74	2	0,85	1,66E-08
	19	6,14	0,91	2	1,00	1,99E-08
0,9	15	7,64	3,15	2	0,65	6,16E-09
	17	7,52	0,24	2	1,00	1,44E-08
	19	9,02	0,95	2	0,75	2,30E-08
CCV		15,35	0,07	2	1,90	2,47E-09

As Figuras 5.2 a 5.4 mostram a interação dos resultados por parâmetro, em função da quantidade de calda por metro linear e traço da calda.

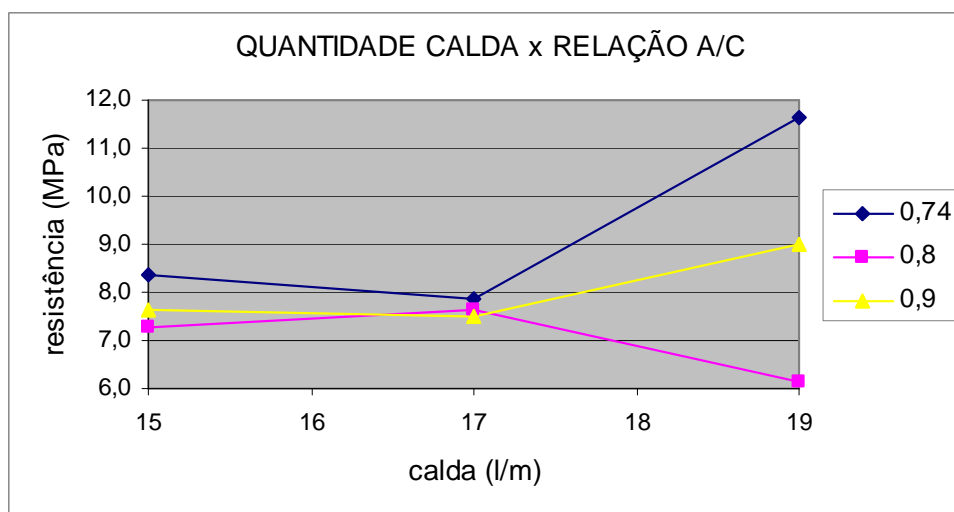


FIGURA 5.2 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Analisando a figura acima, nota-se grande dispersividade dos valores de resistência à compressão, aparentemente sem padrão definido. No entanto, identifica-se um decréscimo de resistência passando-se da calda 0,74 para a calda 0,9, atingindo-se o valor máximo com a combinação calda 0,74 e quantidade 19 l/m.

Segundo a Lei de Abrams a relação água/cimento e a resistência do concreto mantêm uma relação inversa e proporcional entre si, sendo esperada a redução da resistência mecânica passando-se da calda 0,74 para 0,9. O fato deve-se ao

enfraquecimento progressivo da matriz da pasta de cimento com o aumento da porosidade decorrente do aumento da relação água/cimento, sem considerar, no entanto, a resistência da zona de transição (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Apesar de apenas dois ensaios, pode-se verificar as variabilidades em cada combinação e proceder à análise de variância conforme tabela ANOVA. Segundo essa, tanto o efeito dos fatores tomados isoladamente como o efeito da interação deles foram considerados não significativos, para um intervalo de confiança de 95%, sendo desnecessário, portanto, a comparação múltipla de médias entre os efeitos (RIBEIRO e TEN CATEN, 2001).

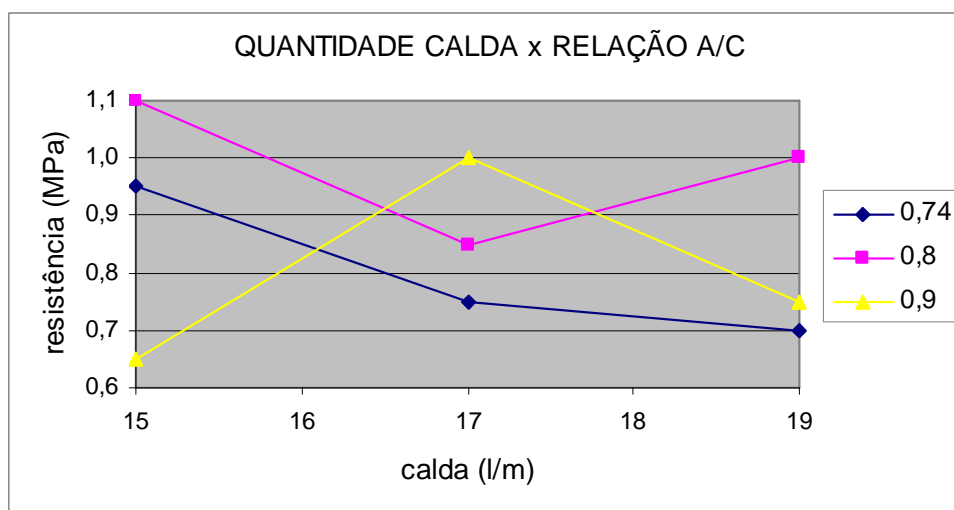


FIGURA 5.3 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

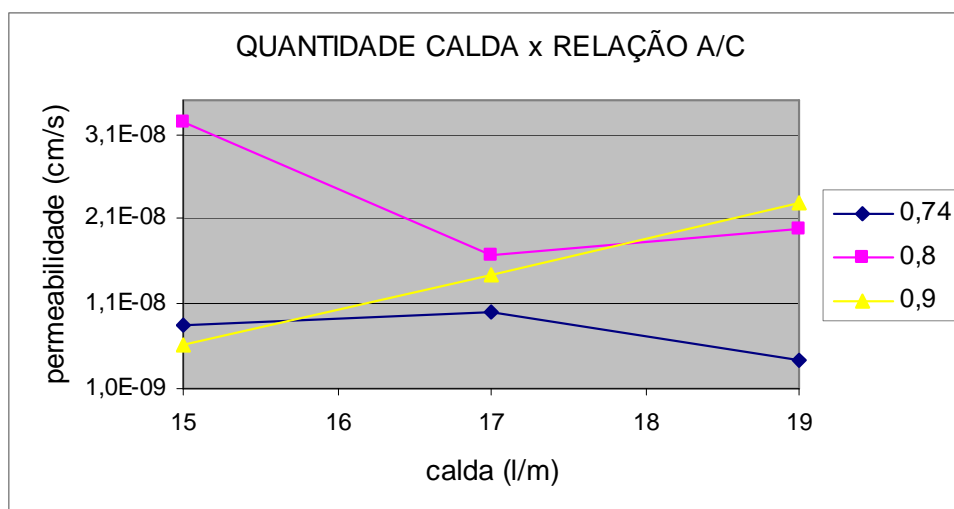


FIGURA 5.4 – RESULTADOS DE PERMEABILIDADE

Da mesma forma, os resultados de resistência à tração e de permeabilidade não apresentam padrão definido, apesar de mostrarem-se bastante próximos. Os melhores valores de permeabilidade referem-se à calda 0,74 e à combinação calda 0,9 e quantidade 15 l/m.

Não foram observadas falhas características do processo de adensamento, como a presença de vazios na massa, mas a dispersividade dos valores, de maneira geral, pode ser atribuída a variações na homogeneidade das misturas, devidas possivelmente à falta de eficiência do aditivo escolhido.

Para uma dada relação água/cimento, concretos com alto consumo de cimento sofrem considerável perda de resistência com o aumento da porosidade, cerca de 10% para cada 2% de vazios incorporados, ao passo que concretos com baixo consumo de cimento podem ganhar ou perder resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Ressalta-se que os resultados de tração por compressão diametral apresentaram disparidades maiores entre si provavelmente devido à natureza do ensaio, que fornece uma medida indireta da resistência e por isso está sujeito a maiores variabilidades.

A Tabela 5.3 e as Figuras 5.5 a 5.7 apresentam um comparativo do CCR enriquecido com o CCV de referência, através de relação entre eles, sendo expressa em percentual para as resistências mecânicas e em número para a permeabilidade.

TABELA 5.3 – COMPARAÇÃO CCR ENRIQUECIDO X CCV DE REFERÊNCIA

COMBINAÇÕES DA CALDA	RELAÇÃO PRISMAS / CCV (%)		
	RESIST.COMP.	RESIST.TRAÇÃO	PERMEAB.
0,74 / 15	55	50	3
0,74 / 17	51	39	4
0,74 / 19	76	37	2
0,8 / 15	47	58	13
0,8 / 17	50	45	7
0,8 / 19	40	53	8
0,9 / 15	50	34	2
0,9 / 17	49	53	6
0,9 / 19	59	39	9
CCV	100	100	1

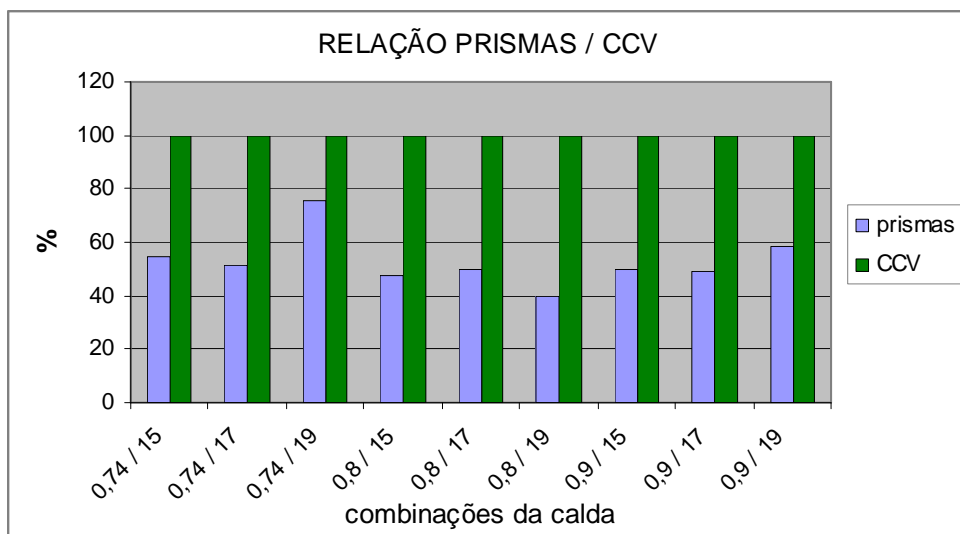


FIGURA 5.5 – COMPARAÇÃO COM CCV DE REFERÊNCIA – COMPRESSÃO

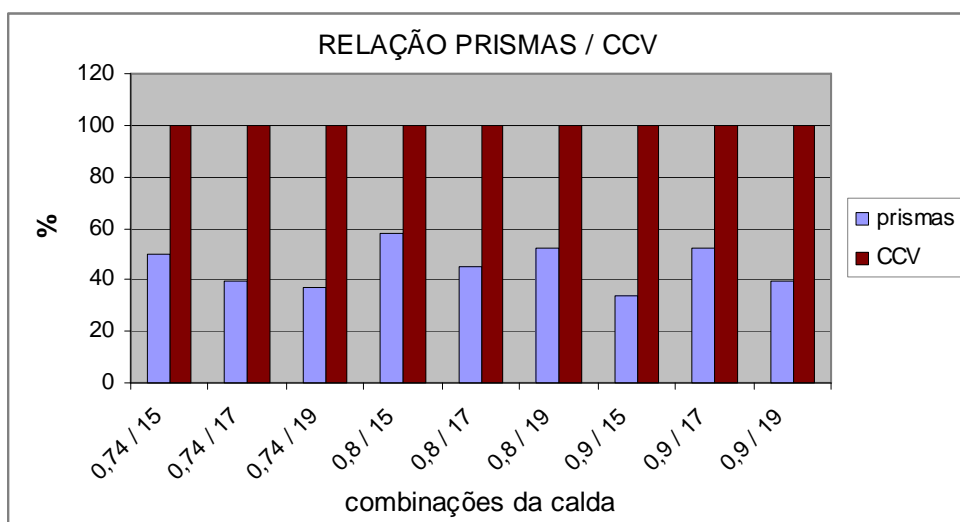


FIGURA 5.6 – COMPARAÇÃO COM CCV DE REFERÊNCIA – TRAÇÃO

Analisando o comparativo das resistências pode-se observar que todas as combinações do CCR enriquecido resultaram inferiores ao valor do CCV de referência, variando de 40 a 76% para compressão e de 34 a 58% para tração.

O motivo principal é o fato de se estar trabalhando com consumos de cimento ligeiramente inferiores ao empregado no concreto convencional de face, conforme será detalhado adiante em item específico (5.4). Tal resultado era esperado e faz parte dos objetivos da pesquisa na tentativa de obtenção de traços mais econômicos.



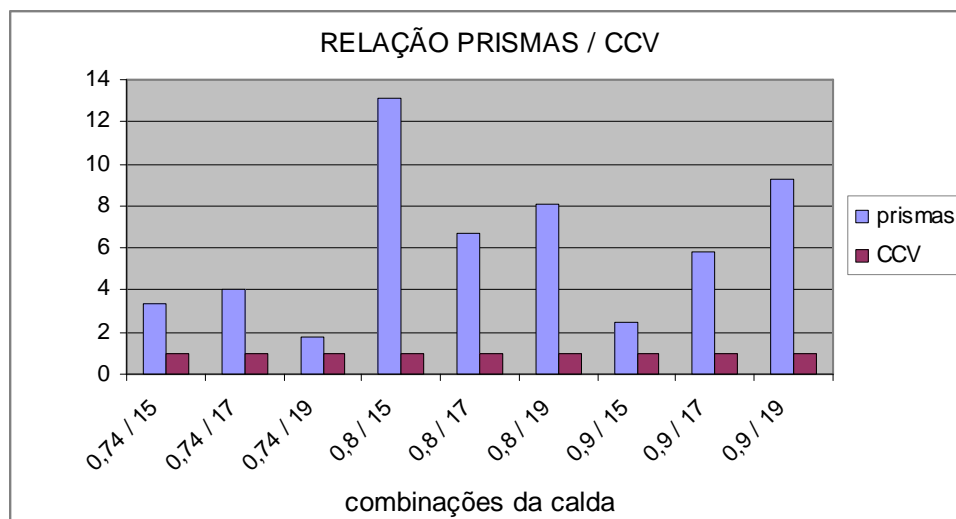


FIGURA 5.7 – COMPARAÇÃO COM CCV DE REFERÊNCIA - PERMEABILIDADE

As relações de permeabilidade mostraram também valores do CCR enriquecido piores em relação ao CCV de referência, mas muitos próximos desse, como o caso da calda 0,74 com resultados da ordem de duas a quatro vezes a permeabilidade do concreto convencional.

A proximidade dos valores de permeabilidade indica um material resultante adequado para a face de barragens de concreto, cujas características de estanqueidade e durabilidade são desejáveis e mais relevantes que a própria resistência mecânica.

### 5.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A seguir serão comparados os valores do CCV de referência com o controle de qualidade da obra e os resultados de resistência mecânica, como forma de validação interna do método de pesquisa.

#### 5.3.1. Comparação com controle da obra

A Tabela 5.4 e a Figura 5.8 apresentam os dados do controle da obra referentes a corpos de prova moldados em concreto convencional de face, e relação desses com o CCV de referência do estudo.

O comparativo da resistência à compressão mostrou-se bastante coerente, situando o valor da CCV do estudo, tomado aos 70 dias de idade, entre os valores

de 28 dias e 90 dias do CCV da obra, mais próximo do último. Quanto à permeabilidade os valores situam-se dentro da mesma ordem de grandeza, sendo considerados tecnicamente iguais.

TABELA 5.4 – COMPARAÇÃO CCV OBRA X CCV ESTUDO

FONTE DADOS	RESIST.COMP.	PERMEAB.
	(Mpa)	(cm/s)
OBRA (28 dias)	12,80	1,43E-09
OBRA (90 dias)	16,80	1,43E-09
ESTUDO	15,35	2,47E-09
REL.OBRA/ ESTUDO (%)	83	58

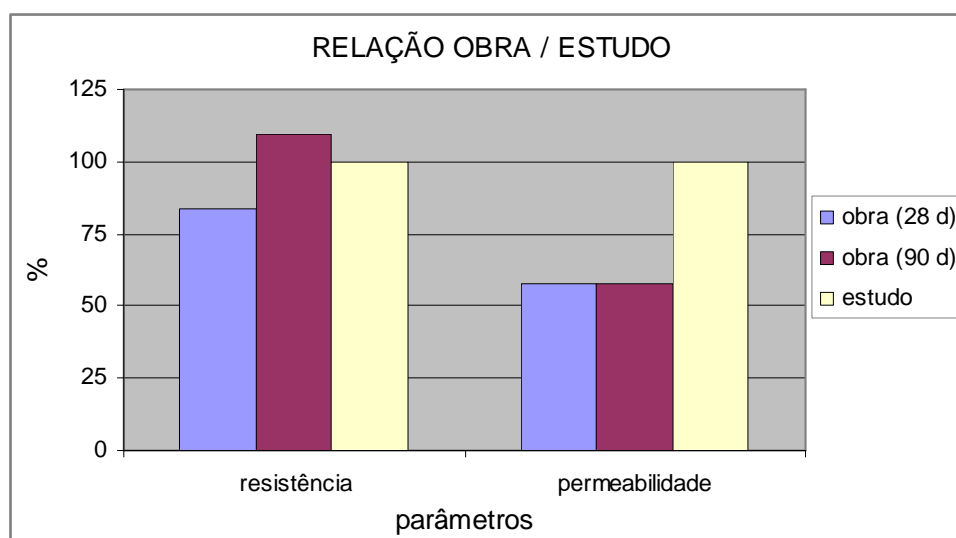


FIGURA 5.8 – COMPARAÇÃO CCV OBRA X CCV ESTUDO

Os fatos apresentados confirmam a validade do método de pesquisa, mesmo esse sujeito a perdas de resistência decorrentes da extração de testemunhos. Segundo AHMED (1999 apud MARQUES FILHO, 2005), para concretos convencionais, resultados em testemunhos apresentam redução de 25% na resistência à compressão em relação aos resultados em corpos de prova moldados.

O mesmo estudo obteve redução de até 30% na resistência à compressão, reduzindo-se o diâmetro do testemunho de 100 mm para 75 mm, para um concreto convencional com dimensão máxima característica do agregado de 19 mm.

### 5.3.2. Resultados de resistência mecânica

Na Tabela 5.5 e Figura 5.9 são apresentados os resultados de resistência mecânica do estudo, ordenados de forma crescente conforme a resistência à compressão, bem como relação entre tração/compressão.

TABELA 5.5 – COMPARAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

COMBINAÇÕES DA CALDA	RESIST.TRAÇÃO (Mpa)	RESIST.COMP. (Mpa)	REL.TRAÇÃO/COMP. (%)
0,8 / 19	1,00	6,14	16
0,8 / 15	1,10	7,28	15
0,9 / 17	1,00	7,52	13
0,9 / 15	0,65	7,64	9
0,8 / 17	0,85	7,65	11
0,74 / 17	0,75	7,88	10
0,74 / 15	0,95	8,37	11
0,9 / 19	0,75	9,02	8
0,74 / 19	0,70	11,63	6
CCV	1,90	15,35	12

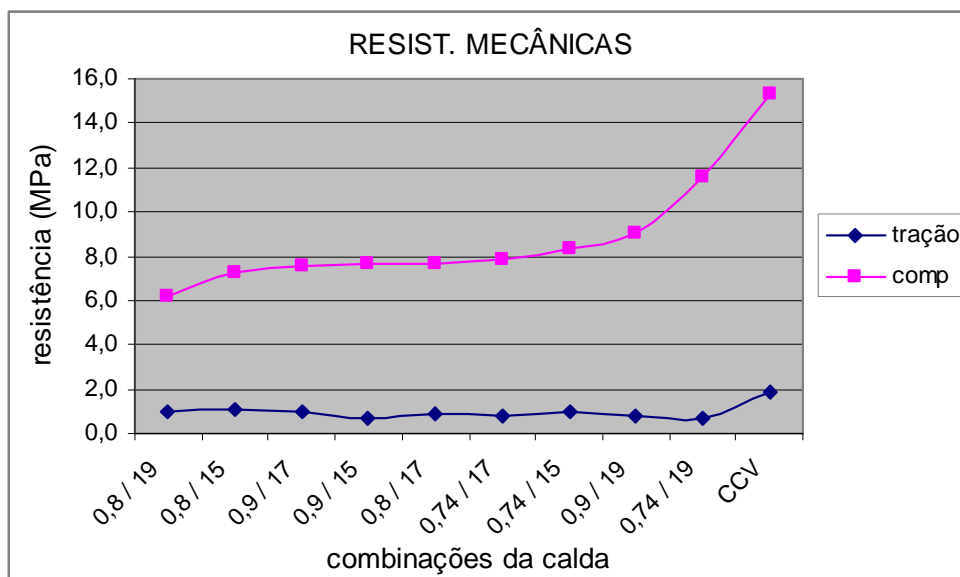


FIGURA 5.9 – COMPARAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

Analisando a relação entre resistências, de maneira geral, observa-se uma redução dessa relação com o aumento da resistência à compressão, conforme

descrito na bibliografia, confirmando a confiabilidade da metodologia empregada. A relação tração/compressão situa-se na ordem de 10 a 11% para concretos de baixa resistência, de 8 a 9% para concretos de média resistência, e de 7% para concretos de alta resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Em comparação com a resistência de projeto para compressão (12 MPa), nota-se que a combinação calda 0,74 e quantidade 19 l/m atingiu praticamente o mesmo valor, atendendo a mais um requisito de projeto, o que reforça a viabilidade de aplicação do CCR enriquecido na face de barragens.

Destaca-se, ainda, que os valores do CCR enriquecido referem-se a uma idade de controle de 70 dias, ao passo que a resistência de projeto corresponde a uma idade de 180 dias.

#### 5.4. RECONSTITUIÇÃO DOS TRAÇOS E ANÁLISE DE CUSTOS

A partir do volume final dos prismas após o adensamento e quantidade de calda colocada, podem-se determinar os consumos dos materiais para cada combinação do CCR enriquecido através da reconstituição dos traços.

Os consumos dos materiais são calculados pela equação genérica 5.1, não sendo consideradas as parcelas referentes à calda no cálculo dos consumos de areia e brita.

$$C = (C_{CCR} \cdot V_{CCR} + C_{calda} \cdot V_{calda}) / V_{prisma} \quad (5.1)$$

Onde:

$C$  = Consumo do CCR enriquecido;

$C_{CCR}$  = Consumo do CCR base;

$V_{CCR}$  = Volume do prisma correspondente ao CCR compactado;

$C_{calda}$  = Consumo da calda;

$V_{calda}$  = Volume do prisma correspondente à calda;

$V_{prisma}$  = Volume total do prisma após o adensamento.

A Tabela 5.6 apresenta os consumos dos materiais obtidos da reconstituição dos traços, e a Figura 5.10 mostra o consumo de cimento real em função da quantidade de calda para cada traço.

TABELA 5.6 – RECONSTITUIÇÃO DOS TRAÇOS DE CCR ENRIQUECIDO

COMBINAÇÕES DA CALDA	C (kg/m <sup>3</sup> )	A (kg/m <sup>3</sup> )	M (kg/m <sup>3</sup> )	B (kg/m <sup>3</sup> )	relação a/c
0,74 / 15	145	171	1166	1135	1,18
0,74 / 17	155	178	1151	1120	1,15
0,74 / 19	165	184	1136	1105	1,12
0,8 / 15	141	173	1166	1135	1,22
0,8 / 17	151	179	1151	1120	1,19
0,8 / 19	160	186	1136	1105	1,16
0,9 / 15	135	175	1166	1135	1,29
0,9 / 17	144	182	1151	1120	1,26
0,9 / 19	153	189	1136	1105	1,24
CCV	195	190	1144	1018	0,97

NOTA: C: consumo de cimento; A: consumo de água; M: consumo de areia; B: consumo de brita.

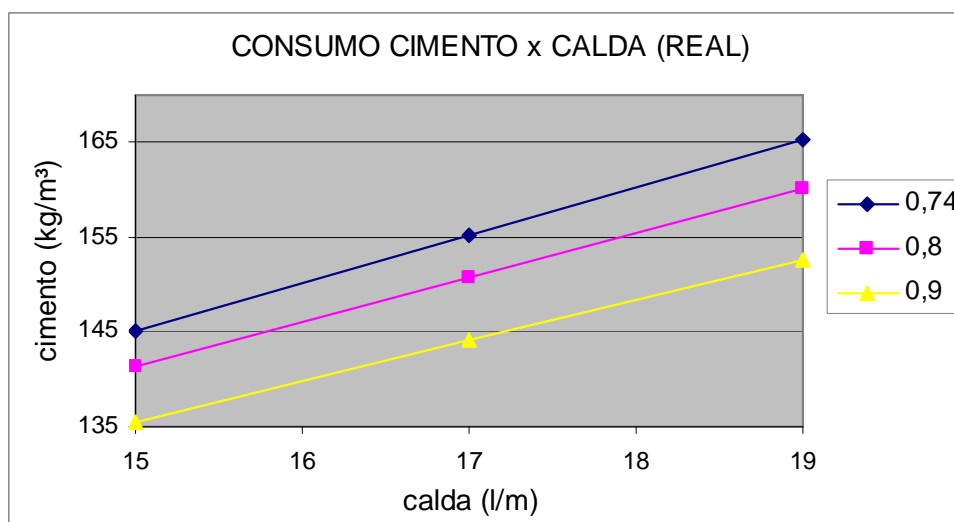


FIGURA 5.10 – CONSUMO DE CIMENTO REAL – CCR ENRIQUECIDO

Pode-se observar que todas as combinações do CCR enriquecido possuem consumos de cimento inferiores ao CCV de referência, variando de 70 a 85%, para os casos de calda 0,9 e 15 l/m e calda 0,74 e 19 l/m, respectivamente. Em

contrapartida, as relações água/cimento resultaram superiores, chegando a 32% maior.

Comparando a Figura 5.10 com a Figura 4.3 apresentada no capítulo anterior, identificam-se diferenças de até 15% nos consumos calculados, isso porque a primeira considera os consumos reais após o adensamento e a segunda parte de consumos teóricos para a obtenção das quantidades de calda.

A Figura 5.11 apresenta os resultados de permeabilidade do CCR enriquecido identificados agora pelos consumos de cimento reais.

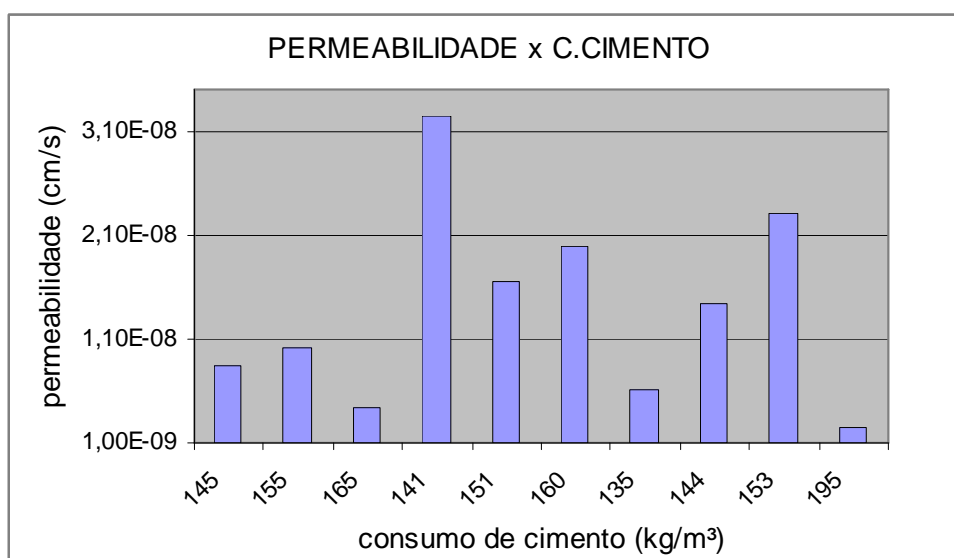


FIGURA 5.11 – RESULTADOS DE PERMEABILIDADE X CONSUMO DE CIMENTO

Conforme mostrado anteriormente, muitos deles possuem a mesma ordem de grandeza que o concreto convencional ( $10^{-9}$  cm/s), mas com consumos de cimento menores que o mesmo (195 kg/m³). Logo, as especificações de projeto para a permeabilidade são completamente atendidas e com economia final para o empreendimento.

Tomando as combinações do CCR enriquecido correspondentes à calda 0,74, com consumos de cimento variando de 145 a 165 kg/m³, a sua utilização na face de montante da barragem representa uma economia total de 25 a 15%, considerando apenas a redução do consumo de cimento.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1. CONCLUSÕES

Com base na apresentação dos resultados dos ensaios de campo e ensaios de laboratório, e observações durante a execução do programa experimental, podem-se listar as seguintes conclusões:

- a) O aditivo empregado, com função de retardador de pega, apresentou problemas quanto à penetração da calda com temperaturas elevadas, tornando seu efeito nulo quando aplicado em misturas acima de 30°C. Também, atribui-se ao tipo do aditivo a diversidade dos resultados de resistência mecânica e de permeabilidade, indicando incertezas quanto ao alcance da homogeneidade ideal com seu emprego. Assim, o estudo específico da dosagem das caldas com outros tipos de aditivos, teores e temperaturas, faz-se necessário para avaliar melhor o enriquecimento com calda do CCR. O presente estudo procurou utilizar os mesmos materiais da obra, por questões de simplicidade, não se atendo a esse aspecto.
- b) A fluidez necessária para a adequada penetração da calda no CCR base, do tipo alto teor de finos (ATF) e com consistência variando de 10 a 12 segundos (*cannon time*), deve situar-se abaixo de 7 segundos conforme ensaio do “cone de Marsh”.
- c) Os limites estabelecidos para o processo de adensamento, utilizando vibrador com diâmetro de 140 mm e tempo de vibração de 15 segundos por ponto, mostraram-se bastante satisfatórios, pois não foram observadas falhas características do adensamento no interior da massa (vazios).
- d) Analisando a interação das combinações não foi possível identificar um padrão de comportamento dos parâmetros estudados em função dos fatores controláveis, com resultados bastante próximos nos casos de resistência à tração e de permeabilidade.

Para minimizar o efeito das variações de homogeneidade, os níveis para a quantidade de calda poderiam ser mais amplos, por exemplo, adotando quantidades de calda e intervalos maiores.

- e) Os resultados do CCR enriquecido mostraram-se inferiores ao CCV de referência, devido à utilização de consumos de cimento notadamente menores. Mesmo assim, a combinação calda 0,74 e 19 l/m atingiu 76% da resistência à compressão do concreto convencional, e praticamente o mesmo valor da resistência à compressão de projeto (12 MPa).

Os valores de permeabilidade para a calda 0,74 variaram cerca de 2 a 4 vezes o valor do CCV, mas dentro das especificações de projeto para aquela obra ( $10^{-9}$  cm/s).

Logo, o CCR enriquecido apresenta as mesmas propriedades do concreto convencional de face, tomando-se a permeabilidade como parâmetro decisivo, além de atender às especificações de projeto quanto à permeabilidade e resistência à compressão.

- f) Analisando a bibliografia, destaca-se que em comparação com a permeabilidade obtida na pista experimental executada na mesma obra, com valor médio de  $10^{-8}$  cm/s, todos os resultados de permeabilidade do estudo situaram-se abaixo desse, indicando confiabilidade na metodologia adotada.

A execução de aterros experimentais está sujeita a maiores variabilidades, uma vez que tem a função de verificar a adaptabilidade dos processos previstos na dosagem e estudos de laboratório.

- g) O método de pesquisa adotado mostrou-se confiável em função das comparações com o controle da obra e entre resistências mecânicas.

Apesar da inevitável perda de resistência mecânica decorrente da extração de testemunhos, o CCV de referência, aos 70 dias, apresentou valores coerentes com o CCV de corpos de prova moldados, situando-se entre os valores de 28 e 90 dias.

A relação tração/compressão manteve o percentual de 10% para concretos nessa faixa de resistência.



- h) Os consumos de cimento reais das misturas de CCR enriquecido mostraram-se inferiores ao concreto convencional ( $195 \text{ kg/m}^3$ ), variando de 70 a 85% em relação a esse, mas dentro dos critérios de projeto.

Logo, sua aplicação na face da barragem representaria uma economia global para o empreendimento de 25 a 15%, utilizando, por exemplo, as misturas correspondentes à calda 0,74, com consumos de 145 a  $165 \text{ kg/m}^3$ .

A obtenção de traços de CCR enriquecido com melhor desempenho, além do benefício econômico traz vantagens no aspecto sócio-ambiental, pois a redução na fabricação das quantidades necessárias de cimento contribui para a questão da sustentabilidade.

- i) A realização da pesquisa no canteiro de obras e a utilização dos mesmos materiais, equipamentos e mão de obra aplicados na barragem levou a resultados bastante próximos das condições reais de execução, faltando, porém, análise quanto à produtividade do processo através da execução de aterros experimentais.

- j) Com base nas impressões dos profissionais envolvidos na pesquisa, da construtora responsável pelo empreendimento e dos laboratórios, observou-se grande resistência para emprego imediato do CCR enriquecido, com preferência por técnicas amplamente conhecidas.

Diferentemente do método da “árvore de natal” discutido anteriormente, o CCR enriquecido apresenta vantagens em termos de simplicidade de execução, pois utiliza o mesmo sistema de transporte do CCR, além de qualidade no acabamento, homogeneidade e monoliticidade com o CCR adajacente, e baixo custo.

Porém, sua aplicação com confiabilidade no meio técnico nacional requer a ampliação do banco de dados existente, através da realização de novos estudos e utilização crescente em novos empreendimentos.

## 6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de complementar e dar continuidade à pesquisa, segue sugestões para trabalhos futuros:

- Estabelecer um comparativo de custos e produtividades entre o CCR enriquecido e o concreto convencional de face, através de estudos em aterro experimental;
- Reproduzir a presente pesquisa com maior número de ensaios e limites com maior amplitude, a fim de obter correlações claras entre os parâmetros investigados;
- Complementar a presente pesquisa testando outros fatores controláveis, referentes ao adensamento (tipo do vibrador e tempo de vibração) e ao CCR base (diferentes traços), para diferentes idades de controle;
- Determinar a compatibilidade entre cimento e aditivo, em função da fluidez das caldas, para diferentes tipos de aditivo, teores empregados e temperaturas;
- Analisar os parâmetros de durabilidade na interface entre o CCR enriquecido e o núcleo da barragem, através de correlações entre microestrutura e permeabilidade;
- Estabelecer uma metodologia para a moldagem de corpos de prova executados em CCR enriquecido;
- Desenvolvimento de dispositivos para a aplicação do CCR enriquecido na barragem, considerando armazenagem, mistura e aplicação da calda, e adensamento, com a máxima produtividade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE. Boletim Técnico nº 4. Associação de Geologia de Engenharia, 1996.

ABNT. NBR 10786: Concreto endurecido – determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989.

ABNT. NBR 5739: Concreto – Ensaio de Resistência à Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

ABNT. NBR 7222: Argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.

ABNT. NBR 7682: Cimento - Calda de cimento para injeção - Determinação do índice de fluidez. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983.

ABNT. NBR 8522: Concreto – determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.

ABNT. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. NBR NM 4: Concreto Compactado com Rolo - Determinação da Densidade “in situ” com o Uso de Densímetro Nuclear - Especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.

ALONSO-FRANCO, M; JOFRÉ, C. RCC dams in Spain – present and future. IV International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Madrid, 2003.

ANDRADE, M.A.S; PIMENTA, M.A; BITTENCOURT, R.M; FONSECA, A.C; FONTOURA, J.T.F; PACELLI DE ANDRADE, W. DMA - A Simple Devide to Measuring Unit Water in RCC Mixtures. IV International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Madrid, 2003.

ANDRIOLO , F.R; SCHMIDT, M.T. The Capanda RCC dam in Angola. International water power & dam construction, 1992.

ANDRIOLO, F.R. The Use of Roller Compacted Concrete. São Paulo: Oficina de Textos, 1998.

ÂNGULO, C; SCHRADER, E.K; SANTANA, H; CASTRO, G; SALAZAR, H; LOPEZ, J. Miel I – Dam. International Simposium on roller compacted concrete dams. Santander, 1995.

BASÍLIO, E.S. Agregados para concreto. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1984.

ASTM C 42-04. Standard test method for obtaining and testing drilled cores and saved beams of concrete. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Col 04.02.

BATISTA, E.L; GRAÇA, N.G; ANDRADE, W.P; SANTOS, F.C.R; MOREIRA, L.C. Execução de concreto compactado com rolo rampado em Lajeado – Consolidação da experiência. 44º Congresso brasileiro do concreto, Belo Horizonte, 2002.

BATISTA, E.L; GRAÇA, N.G; BITTENCOURT, R.M; ANDRADE, W.P. First brazilian experience using the advancing sloped layers construction of RCC at Lajeado Dam. 22º USSD Conference, 2002 b.

BATISTA, E.L; GRAÇA, N.G; BITTENCOURT, R.M; ANDRADE, W.P. Primeira experiência brasileira com execução de concreto compactado com rolo rampado em Lajeado. 24º Seminário nacional de grandes barragens, Fortaleza, 2001.

BATISTA, E.L; GRAÇA, N.G; BITTENCOURT, R.M; ANDRADE, W.P; GUIMARÃES, R.M; SANTOS, F.C.R. Estudos do concreto compactado com rolo para a face de barragens – ensaios executados in situ. 44º Congresso brasileiro do concreto, Belo Horizonte, 2002 a.

CANNON, R.W. Compaction of mass concrete with vibratory roller. ACI Journal, Detroit, 1974.

CBGB; ELETROBRAS; IBRACON. Concreto massa no Brasil – Memória técnica. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 1989.

CRUZEIRO DO SUL. Informativo sobre a construção da UHE Mauá - Consórcio energético Cruzeiro do Sul. Disponível em: [www.consorcio Cruzeiro dosul.com.br](http://www.consorcio Cruzeiro dosul.com.br). Acesso em: 05/03/10.

FORBES, B.A. Grout enriched RCC – A history and future. International water power & dam construction, 1999.

FORBES, B.A. RCC – New developments and innovations. 50º Congresso brasileiro do concreto, Salvador, 2008.

FORBES, B.A. Using sloped layers to improve RCC dam construction. Civil structures, Hidro review worldwide (HRW), 2003.

FORBES, B.A; YANG, L; TANG, G; YANG, K. Jiangya dam – some interesting techniques developed for high quality RCC construction. International symposium on roller compacted concrete dam, China, 1999.

FRANCO, F.R; AITA, C.A; ARAÚJO, T.A; LIMA, G.A.R; CESCO, R.J. Barragem de Val da Serra – Aspectos de construção. III Seminário nacional de concreto compactado com rolo, Foz do Iguaçu, 1998.

GENTILE, G. Study, Preparation and Placement of Low Cement Concrete with Special Regards to Its Use in Solid Gravity Dams. VIII International Congress on Large Dams, Edinburgh, 1964.

GRAÇA, N.G; BATISTA, E.L; BITTENCOURT, R.M; ANDRADE, W.P. Brazilian experience of roller compacted concrete. IV International symposium on roller compacted concrete dams, Madrid, 2003.

HADLEY, H.M. Discussion - Masonry dams. ASCE, 1941.

HANSEN, K.D; REINHARDT, W.C. Roller Compacted Concrete Dams. New York: McGraw-Hill, 1991.

HASPARYK, N.P; FARIAS, L.A; MUNIZ, F.C; ANDRADE, M.A.S; TEIXEIRA, M.P; ANDRADE, W.P. Concreto compactado com rolo – Um estudo da durabilidade e microestrutura na presença de adições. V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, São Paulo, 2003.

ICOLD. State of the art of roller compacted concrete dams. International commission on large dams, 1997.

ICOLD-CIGB. Concrete dams – Control and treatment of cracks. Bulletin 107 of International commission on large dams, Paris, 1997 a.

IDNR. Indiana Dam Safety Inspection Manual. Indiana: Indiana Department of Natural Resources, 2003.

ISAÍÁ, G.C. Concreto – Ensaio, pesquisa e realizações. São Paulo: Instituto brasileiro do Concreto, 2005.

KUPERMAN, S.C. Barragens Brasileiras de Concreto Compactado com Rolo - Passado, Presente e Futuro. II Simpósio Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba, 1996.

LACERDA, D; CABRAL, D; MATHIAS, H; LEMOS, M; RIVELINO, R. Fatores que determinaram o CCR – Concreto compactado com rolo como material para o projeto estrutural da Barragem do AHE Peixe Angelical. Trabalho final de graduação, Universidade católica de Goiás, 2006.

MARQUES FILHO, J. Maciços Experimentais de Laboratório de Concreto Compactado com Rolo aplicado às Barragens. Tese de doutorado em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

MARQUES FILHO, J; MARINO, M.A; GABINO, A.S.G; KIDO, A.T. Parâmetros necessários ao projeto de barragens de CCR – Barragem de Derivação do Jordão como exemplo. II Simpósio nacional de concreto compactado com rolo, Curitiba, 1996.

MARQUES FILHO, J; TRABOULSI, M.A; PAULON, V.A. Estudo de traumatismos em testemunhos de CCR. Espaço energia, 2004.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: PINI, 2008.

MOFFAT, A.I.B. A study of dry lean concrete applied to the construction of gravity dams. XI International congress on large dams, Madrid, 1973.

MONTGOMERY, D.C. Design and analysis of experiments. New York: John Wiley and sons, 1991.

MOSER, D.E; MUSSI, J.M.P; ANDRIOLO, F.R. O Uso de Aditivo Plastificante e Retardador de Pega no CCR – Propriedades e Benefícios. III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu, 1998.

MOSER, D.E; STEFFEN, R.D; BRITO, C; MUSSI, J.M.P. Quality control RCC of Dona Francisca Dam. IV International symposium on roller compacted concrete dams, Madrid, 2003.

NAGATAKI, S; FUSIJAWA, T; KAWASAKI, H. State of art of RCD dams in Japan. 50º Congresso brasileiro do concreto, Salvador, 2008.

NAGAYAMA, I; JIKAN, S. 30 Years History of Roller Compacted Concrete Dams in Japan. IV International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Madrid, 2003.

NETTO, F.F; BETIOLI, I; DUARTE, J.D.C; ROSÁRIO, L.C; BRAGA, J.A; MISAEL, S.A; ANDRIOLO, F.R. Aplicação, Ensaios e Pesquisas do Concreto Compactado com Rolo na Itaipu Binacional. I Simpósio de Obras em Concreto Compactado com Rolo, São Paulo, 1995.

OLIVEIRA, L.F.P; MUSSI, J.M.P; MOSER, D.E. Desenvolvimento do método executivo de concreto compactado com rolo – A experiência da COPEL. XVIII Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, Curitiba, 2005.

OLIVEIRA, P.J.R; SALLES, F.M. Concreto Compactado a Rolo - Características e Propriedades. I Simpósio de Obras em Concreto Compactado com Rolo, São Paulo, 1995.

PACELLI DE ANDRADE, W. Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e propriedades. Equipe de FURNAS – Laboratório de concreto, 1997.

PACELLI DE ANDRADE, W. Notas sobre o concreto compactado com rolo. Goiânia, 1991.

PACELLI DE ANDRADE, W. Relato do Tema V - Pesquisas e Perspectivas de Futuro Envolvendo CCR. II Seminário de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba, 1996.

PACELLI DE ANDRADE, W; ANDRIOLO, F.R. Barragens em CCR – Sistemas de impermeabilização. II Simpósio Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Curitiba, 1996.



PACELLI DE ANDRADE, W; ANDRIOLO, F.R. Dosagem do CCR: Alta pasta? RCD? Pobre? Ou adequado teor de finos? . III Seminário nacional de concreto compactado com rolo, Foz do Iguaçu, 1998.

PAULON, V.A. O fenômeno térmico no concreto. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1987.

PAULON, V.A; DALMOLIN, D; MARQUES FILHO, J; PACELLI DE ANDRADE, W. Caracterização do concreto compactado com rolo em laboratório. e-Mat – Revista de ciência e tecnologia de materiais de construção civil, 2004.

PAULON, V.A; KREMPEL, A.F; CREVILARO, C.C. Adição de pó ao concreto como fator econômico e de durabilidade. 34ª Reunião do IBRACON, Curitiba, 1992.

PCA. Bonding Roller Compacted Concrete Layers. Concrete Information. Skokie, USA: Portland Cement Association, 1987.

RAPHAEL, J.M. The optimum gravity dam – Rapid construction of concrete dams. Engineering foundation research conference, Pacific Grove, Califórnia: ASCE, 1970.

RESENDE, F.D. Concreto compactado com rolo – Melhores práticas. Construtora Norberto Odebrecht SA, 2005.

RIBEIRO, A.B. Betão compactado com cilindros – Composição e características. Tese de doutorado em engenharia, Universidade do Porto, 1998.

RIBEIRO, J.L.D; TEN CATEN, C. Projeto de experimentos. Curso de pós-graduação em engenharia civil, UFRGS, 2001.

RICHARDSON, A.T. Performance of Upper Stillwater dam. RCC specialty conference, San Diego, Califórnia: ASCE, 1992.

SANTANA, H; CASTELL, E. RCC record breaker. Water power and dam construction, United Kingdom, 2004.

SCHRADER, E.K. Roller compacted concrete for dams – State of the art. International conference on advances in concrete technology, Athens, Greece, 1992.


SCHRADER, E.K. The first concrete gravity dam designed and built for roller compacted concrete methods. Concrete international, ACI, Detroit, 1982.

TRABOULSI, M. A. Análise do Comportamento de Juntas de CCR com Alto Teor de Finos. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

VICARI, L.F; SILVA, N.A; SILVEIRA, R.L; BITTENCOURT, R.M; PACELLI DE ANDRADE, W. Estudos de Concreto Compactado com Rolo com Alto Teor de Finos. III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, Foz do Iguaçu, 1998.

WENDLER, A. P; TURRA, C; SERIGHELI JÚNIOR, I. Estudo da Fissuração Térmica do Concreto em Barragens. Monografia de especialização em Patologias em Obras Cíveis, UTP, Curitiba, 2007.

**ANEXO A**  
**RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

 <b>INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO</b>	<b>RELATÓRIO DE ENSAIOS</b>	DOCUMENTO Nº <b>RE LAME 035.2010-R0</b>
<b>LAME – LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS</b> Centro Politécnico da UFPR – Caixa Postal 19086 - CEP 81531-980 – Curitiba - PR Fone: +55 41 3361-6320 Fax: +55 41 3361-6141 jeferson.l Luiz@lactec.org.br	DATA DE EMISSÃO <b>07/04/2010</b>	PÁGINA <b>1 de 9</b>

## RELATÓRIO DE ENSAIOS

**Interessado:** PADA – Aluno Anthony Wendler  
Prof. José Marques Filho  
Fone: (41) 9996-3673 / 3276-1049  
Contato: Anthony Wendler (apwendler@pop.com.br)

**Ensaio realizado:** Testemunhos de Concreto:  
- Determinação da resistência à tração por compressão diametral;  
- Determinação da resistência a compressão axial;  
- Determinação do coeficiente de permeabilidade à água.


**As considerações e resultados contidos neste relatório têm validade restrita às amostras analisadas e às condições de ensaio.**

### 1. AMOSTRA

As amostras foram entregues no DPEC pelo solicitante, no dia 05/03/2010, onde foram registradas conforme segue:

Registro	Descrição	Origem	Orçamento
1.0206.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	1C1	10531/2010
1.0207.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	1C2	
1.0208.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	1T	
1.0209.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	2C1	
1.0210.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	2C2	
1.0211.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	2T	
1.0212.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	3C1	
1.0213.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	3C2	
1.0214.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	3T	
1.0215.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	4C1	
1.0216.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	4C2	
1.0217.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	4T	
1.0218.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	5C1	
1.0219.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	5C2	
1.0220.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	5T	
1.0221.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	6C1	
1.0222.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	6C2	
1.0223.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	6T	
1.0224.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	7C1	
1.0225.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	7C2	
1.0226.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	7T	
1.0227.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	8C1	
1.0228.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	8C2	
1.0229.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	8T	
1.0230.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	9C1	
1.0231.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	9C2	

REPRODUÇÕES DESTE DOCUMENTO SÓ TÊM VALIDADE SE FOREM INTEGRAIS E AUTORIZADAS PELO LACTEC

	<b>INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO</b>	<b>RELATÓRIO DE ENSAIOS</b>	DOCUMENTO Nº <b>RE LAME 035.2010-R0</b>
<b>LAME – LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS</b> Centro Politécnico da UFPR – Caixa Postal 19086 - CEP 81531-980 – Curitiba - PR Fone: +55 41 3361-6320 Fax: +55 41 3361-6141 jeferson.lui@lactec.org.br		DATA DE EMISSÃO <b>07/04/2010</b>	PÁGINA <b>2 de 9</b>

Registro	Descrição	Origem	Orçamento
1.0232.10	Testemunho de CCR Ø100,0 mm	9T	10531/2010
1.0233.10	Testemunho de CCR Ø150,0 mm	1P	
1.0234.10	Testemunho de CCR Ø150,0 mm	2P	
1.0235.10	Testemunho de CCR Ø150,0 mm	3P	
1.0236.10	Testemunho de CCR Ø150,0 mm	4P	
1.0237.10	Testemunho de CCR Ø150,0 mm	5P	
1.0238.10	Testemunho de CCR Ø150,0 mm	6P	
1.0239.10	Testemunho de CCR Ø150,0 mm	7P	
1.0240.10	Testemunho de CCR Ø150,0 mm	8P	
1.0241.10	Testemunho de CCR Ø150,0 mm	9P	
1.0242.10	Testemunho de CCV Ø100,0 mm	CCV	
1.0243.10	Testemunho de CCV Ø150,0 mm	CCV	

## 2. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

NBR 5739/2007 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto;

NBR 7222/94 - Argamassas e concretos - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos;

NBR 10786/89 - Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de permeabilidade à água.

## 3. RESULTADOS OBTIDOS


### 3.1. Determinação da resistência à compressão axial.

Os ensaios de determinação da resistência à compressão axial em testemunhos de concreto foram realizados segundo a NBR 5739 (ABNT 2007), utilizando uma máquina universal de ensaios modelo DL 30.000 marca EMIC devidamente calibrada segundo o certificado de calibração EMIC-DCAME 176/10 em 16.03.10, sendo que os resultados estão apresentados nas Tabela 01 e 02 a seguir:

**Tabela 01 – Determinação da resistência à compressão axial – Amostras: 1.0206.10 a 1.0219.10**

Registro da amostra	Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força Máxima (N)	Fator de Correção	Resistência à Compressão (MPa)	Tipo de Ruptura	Data de Ruptura	Hora de Ruptura	Idade (Dias)
1.0206.10	1	103,7	206,2	66.221	1,00	7,84	Tipo D	17/03	9:45	68
1.0207.10	1	104,0	208,6	75.512	1,00	8,89	Tipo E	17/03	9:48	68
1.0209.10	1	104,0	218,3	60.067	1,00	7,07	Tipo E	18/03	15:53	69
1.0210.10	1	104,0	204,2	73.760	1,00	8,68	Tipo E	18/03	15:56	69
1.0212.10	1	104,0	191,5	78.609	0,99	9,16	Tipo E	18/03	15:59	69
1.0213.10	1	103,9	187,2	120.940	0,99	14,1	Tipo D	18/03	16:00	69
1.0215.10	1	104,0	203,0	50.246	1,00	5,91	Tipo B	18/03	16:05	69
1.0216.10	1	104,0	176,0	74.901	0,98	8,64	Tipo E	18/03	16:10	69
1.0218.10	1	104,0	200,5	81.502	1,00	9,59	Tipo E	18/03	16:12	69
1.0219.10	1	104,0	204,2	48.535	1,00	5,71	Tipo D	18/03	16:14	69
Na execução do ensaio foi utilizada máquina com faixa nominal classe 1, segundo a NBR ISO 7500-1/2004.										
A preparação das bases/topos dos corpos-de-prova foi realizada com pasta de enxofre.										

REPRODUÇÕES DESTE DOCUMENTO SÓ TÊM VALIDADE SE FOREM INTEGRAIS E AUTORIZADAS PELO LACTEC




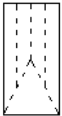
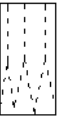









 <b>INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO</b>	<b>RELATÓRIO DE ENSAIOS</b>	DOCUMENTO Nº <b>RE LAME 035.2010-R0</b>
<b>LAME – LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS</b> Centro Politécnico da UFPR – Caixa Postal 19086 - CEP 81531-980 – Curitiba - PR Fone: +55 41 3361-6320 Fax: +55 41 3361-6141 jeferson.luiz@lactec.org.br	DATA DE EMISSÃO <b>07/04/2010</b>	PÁGINA <b>3 de 9</b>

**Tabela 02 – Determinação da resistência à compressão axial – Amostras: 1.0221.10 a 1.0242.10**

Registro da amostra	Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força Máxima (N)	Fator de Correção	Resistência à Compressão (MPa)	Tipo de Ruptura	Data de Ruptura	Hora de Ruptura	Idade (Dias)
1.0221.10	1	104,0	204,0	46.742	1,00	5,50	Tipo E	18/03	16:15	69
1.0222.10	1	104,0	205,6	57.582	1,00	6,78	Tipo E	18/03	16:20	69
1.0224.10	1	104,1	207,5	46.008	1,00	5,41	Tipo D	18/03	16:21	69
1.0225.10	1	104,1	210,0	83.937	1,00	9,86	Tipo E	18/03	16:22	69
1.0227.10	1	103,9	215,2	62.349	1,00	7,35	Tipo D	18/03	16:25	69
1.0228.10	1	104,0	217,7	65.365	1,00	7,69	Tipo E	18/03	16:27	69
1.0230.10	1	104,0	210,0	70.866	1,00	8,34	Tipo E	18/03	16:30	69
1.0231.10	1	104,0	214,7	82.307	1,00	9,69	Tipo D	18/03	16:31	69
1.0242.10	1	104,6	209,1	131.209	1,00	15,3	Tipo E	18/03	16:35	69
	2	104,2	218,5	131.698	1,00	15,4	Tipo E			
Na execução do ensaio foi utilizada máquina com faixa nominal classe 1, segundo a NBR ISO 7500-1/2004.										
A preparação das bases/topos dos corpos-de-prova foi realizada com pasta de enxofre.										

Na Tabela 03 estão apresentados os tipos de ruptura descritos na NBR 5739 (ABNT 2007).

**Tabela 03 - Tipos de ruptura de corpos de prova de concreto – NBR 5739 (ABNT 2007)**

Tipos de Ruptura de Corpos-de-prova	
	
Tipo A	
	
Tipo B	
	
Tipo C	
	
Tipo D	
	
Tipo E	
	
Tipo F	
	
Tipo G	

Tipo A	Cônica e cônica afastada 25mm do capeamento
Tipo B	Cônica e bipartida e cônica com mais de uma partição
Tipo C	Colunar com formação de cones
Tipo D	Cônica e cisalhada
Tipo E	Cisalhada
Tipo F	Fraturas no topo e/ou a base abaixo do capeamento
Tipo G	Similar ao tipo F, com fraturas próximas ao topo

### 3.2. Determinação da resistência à tração por compressão diametral.

Os ensaios de determinação da resistência à tração por compressão diametral em testemunhos de concreto foram realizados segundo a NBR 7222 (ABNT 1994), utilizando uma máquina universal de ensaios modelo DL 30.000 marca EMIC devidamente calibrada segundo o certificado de calibração EMIC-DCAME 176/10 em 16.03.10, sendo que os resultados estão apresentados na Tabela 04 a seguir:

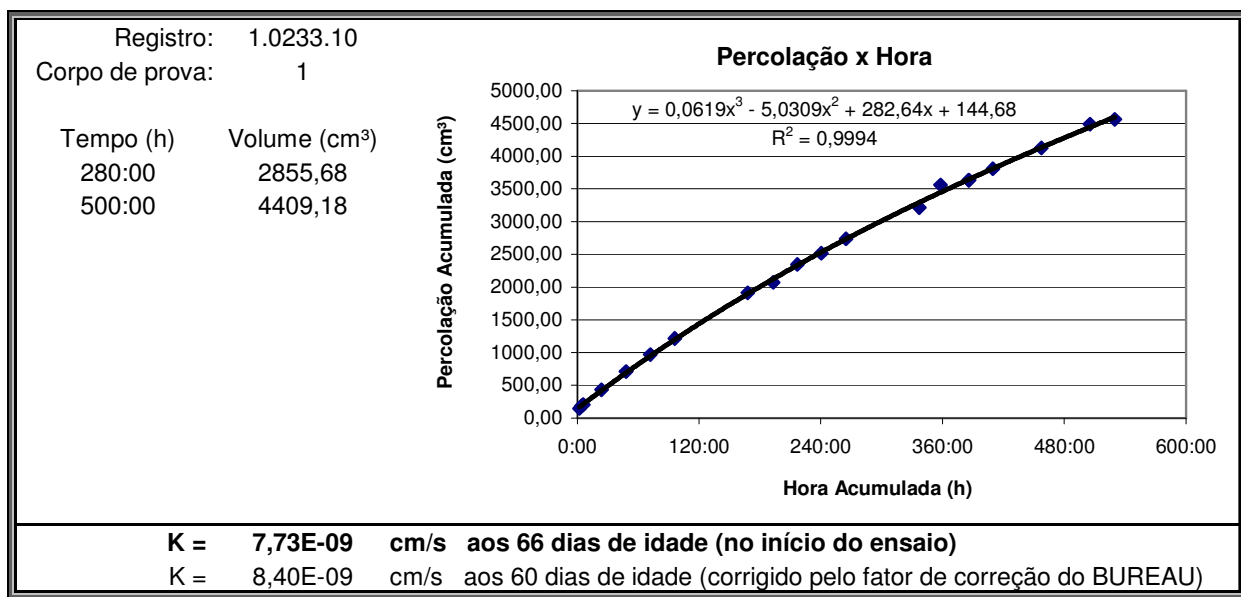
**Tabela 04 – Determinação da resistência a tração por compressão diametral – Amostras: 1.0208.10 a 1.0242.10**

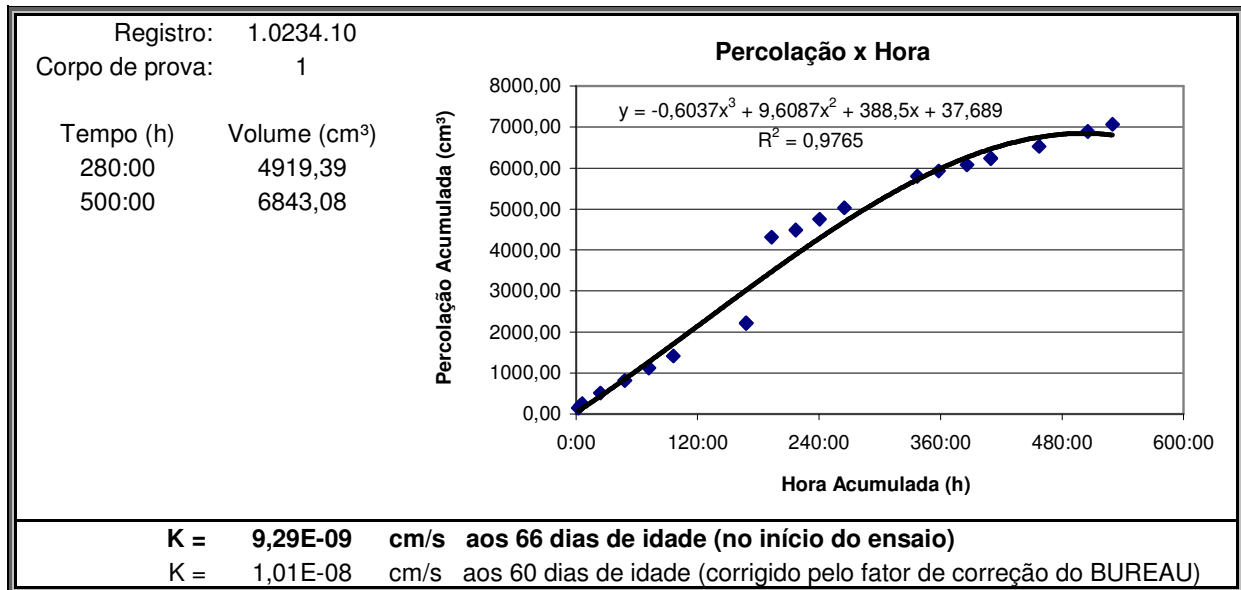
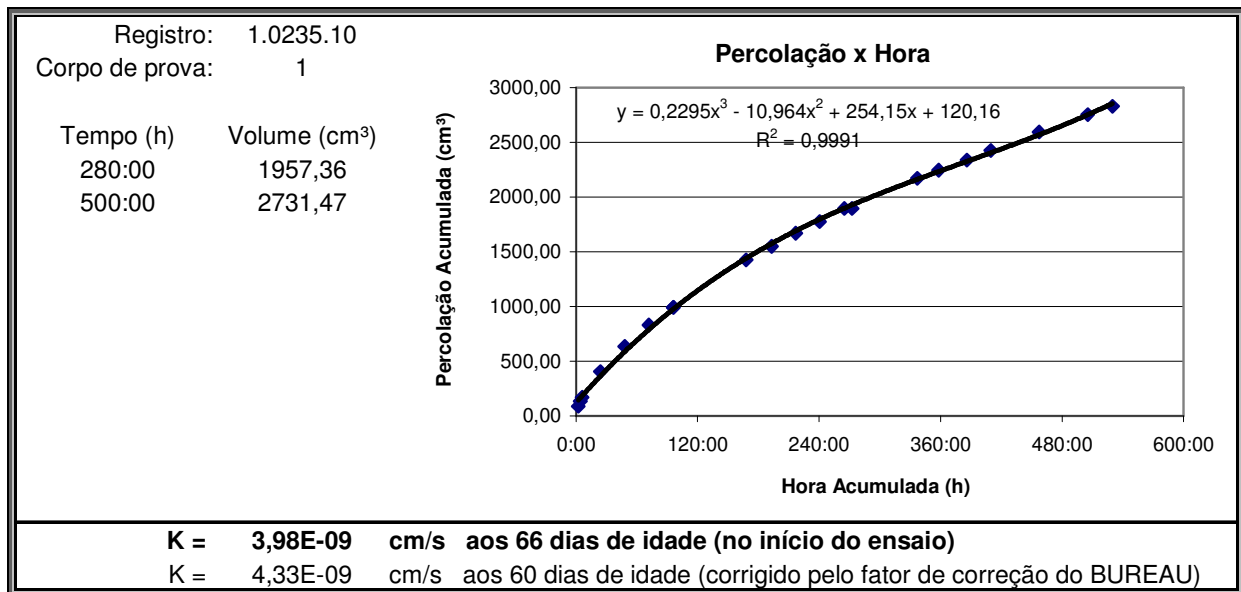
AMOSTRA	C.P.	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CARGA DE RUPTURA (kgf)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	IDADE (dias)	TEMPO (s)
1.0208.10	1	103,9	207,7	3.316	0,95	70	22
1.0211.10	1	104,0	211,9	2.714	0,75	70	19
1.0213.10	1	103,9	193,2	2.269	0,70	70	17
1.0214.10	1	104,0	218,3	4.089	1,10	70	25
1.0220.10	1	103,8	161,5	2.273	0,85	70	19
1.0223.10	1	104,2	208,2	3.561	1,00	70	23
1.0226.10	1	103,8	213,0	2.236	0,65	70	18
1.0229.10	1	104,0	197,4	3.304	1,00	70	22
1.0232.10	1	103,8	195,6	2.448	0,75	70	19
1.0242.10	1	104,1	199,6	6.341	1,90	70	39

### 3.3. Determinação do coeficiente de permeabilidade a água.

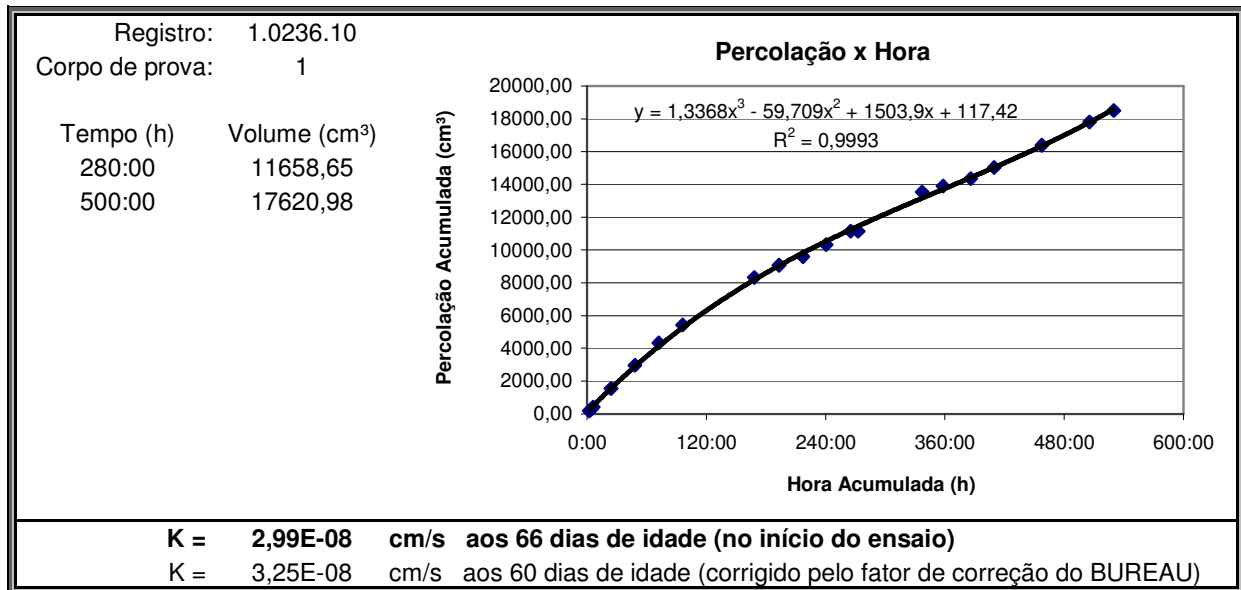
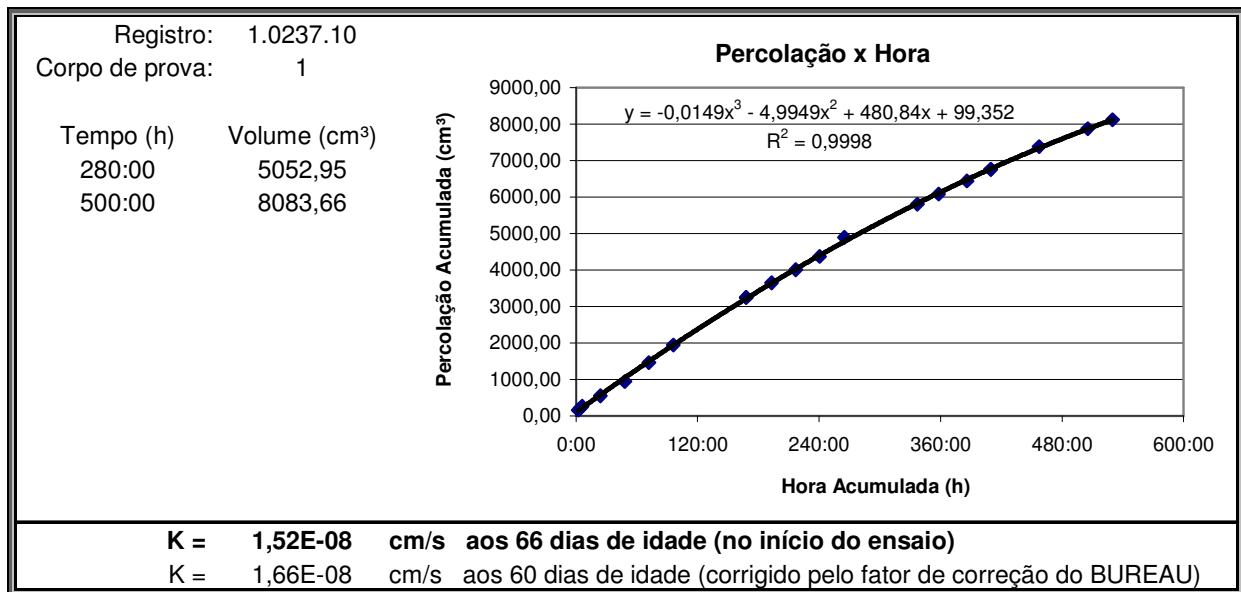
Os ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade a água em testemunhos de concreto foram realizados segundo a NBR 10786 (ABNT 1989), sendo que os resultados estão apresentados nas Tabelas de 05 a 14 a seguir.

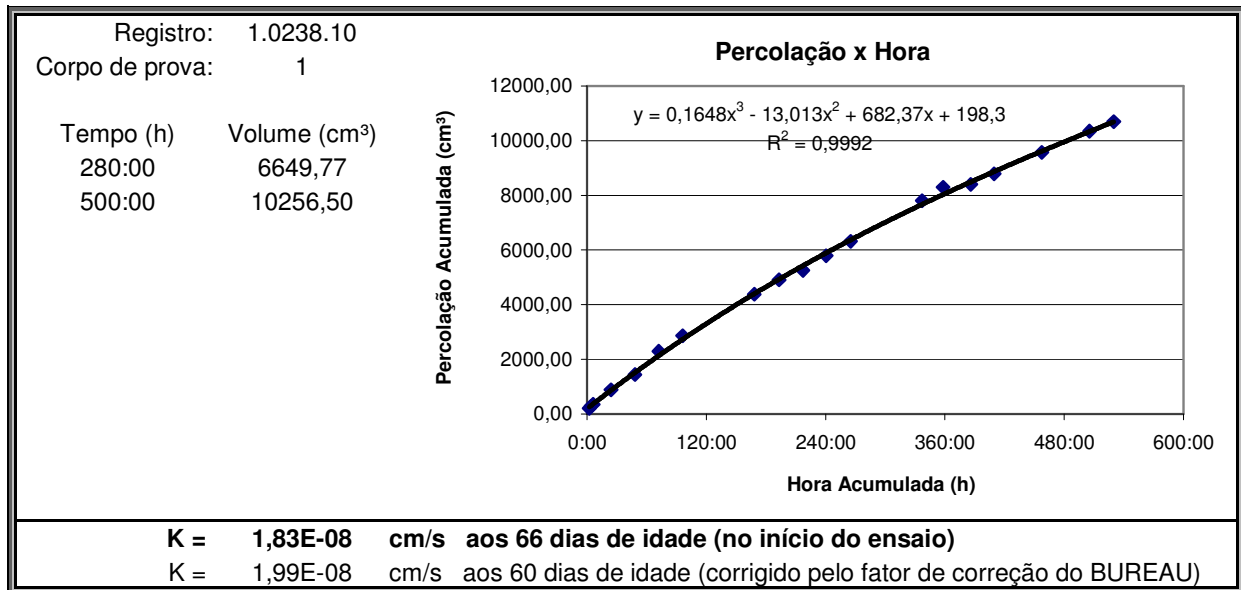
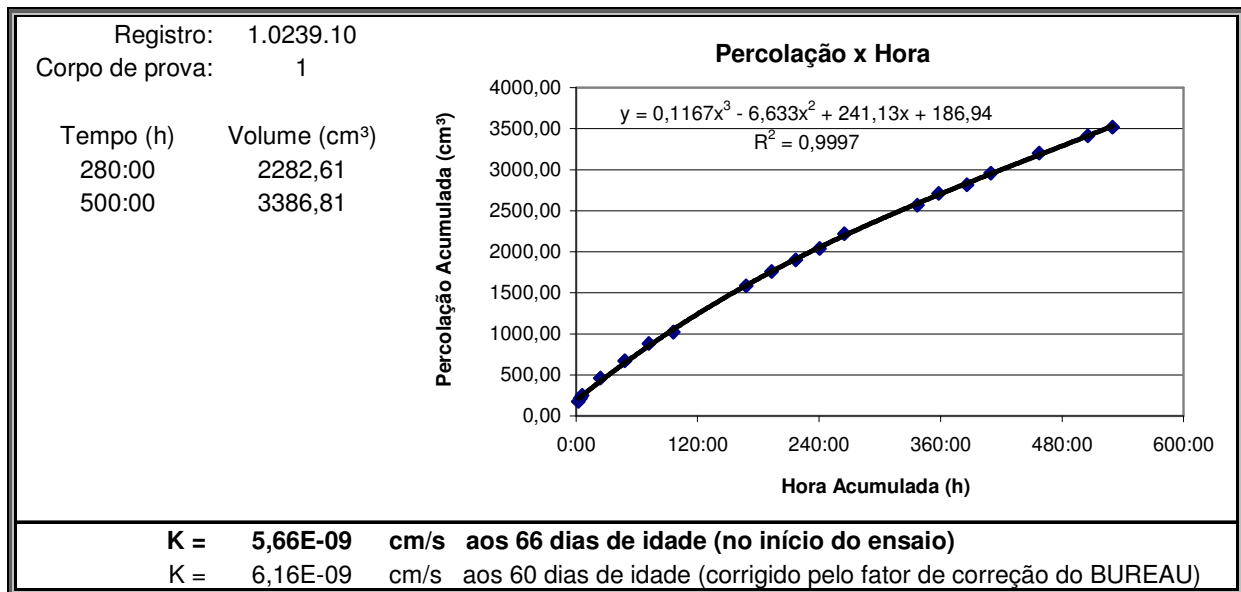
**Tabela 05 – Coeficiente de permeabilidade a água – Amostra: 1.0233.10**

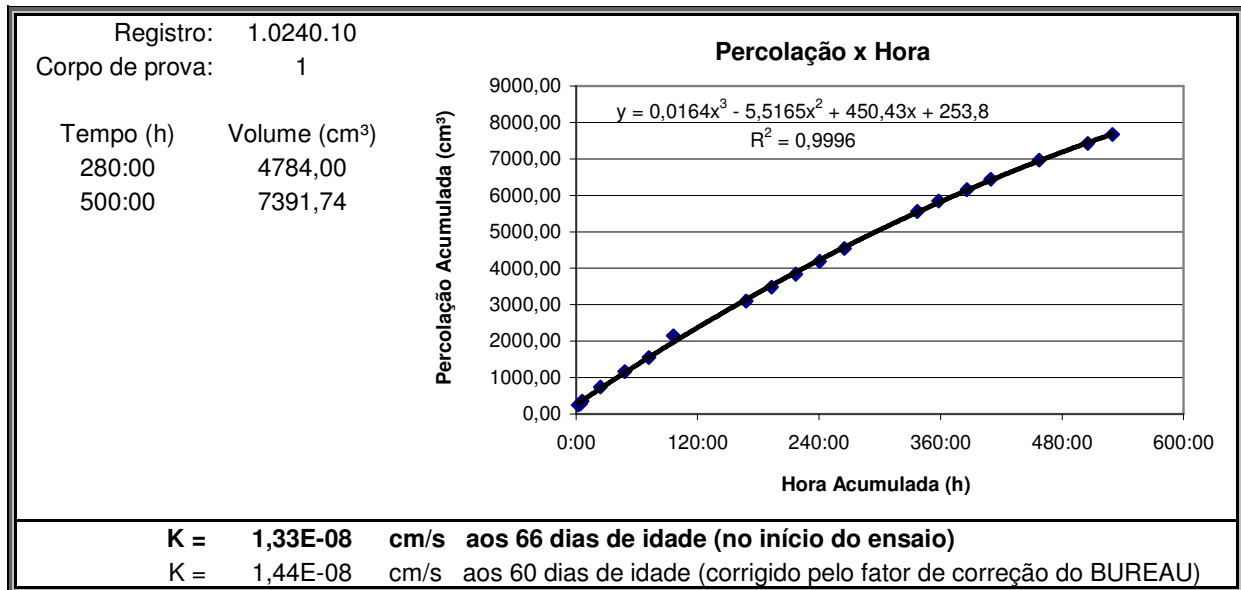
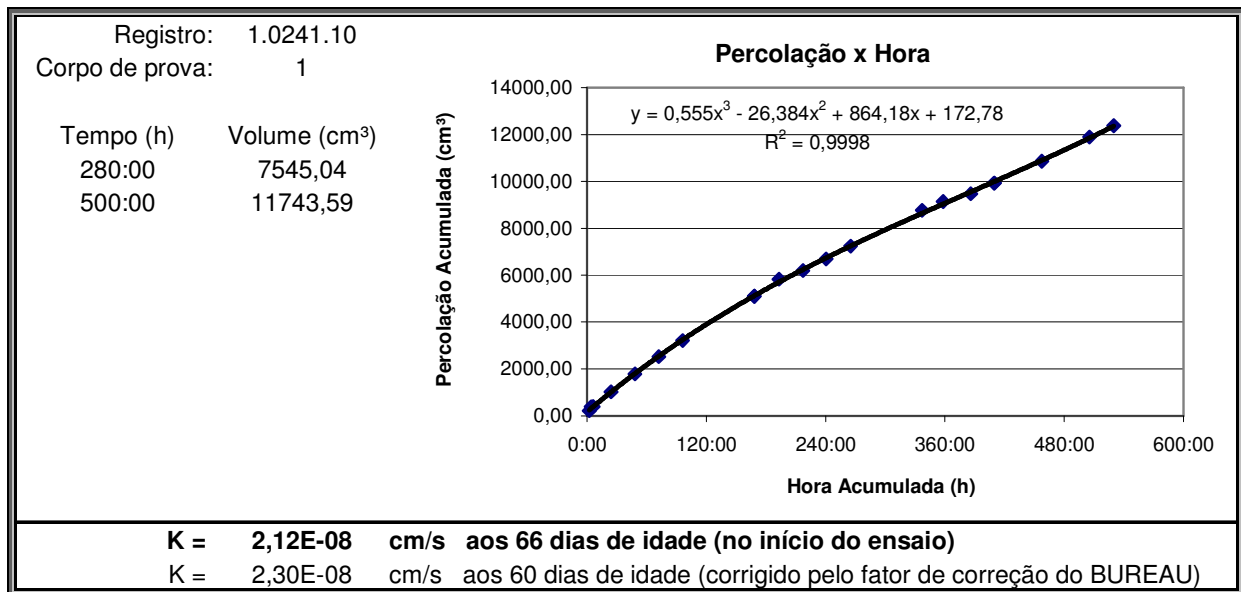



**Tabela 06 – Coeficiente de permeabilidade a água – Amostra: 1.0234.10**

**Tabela 07 – Coeficiente de permeabilidade a água – Amostra: 1.0235.10**




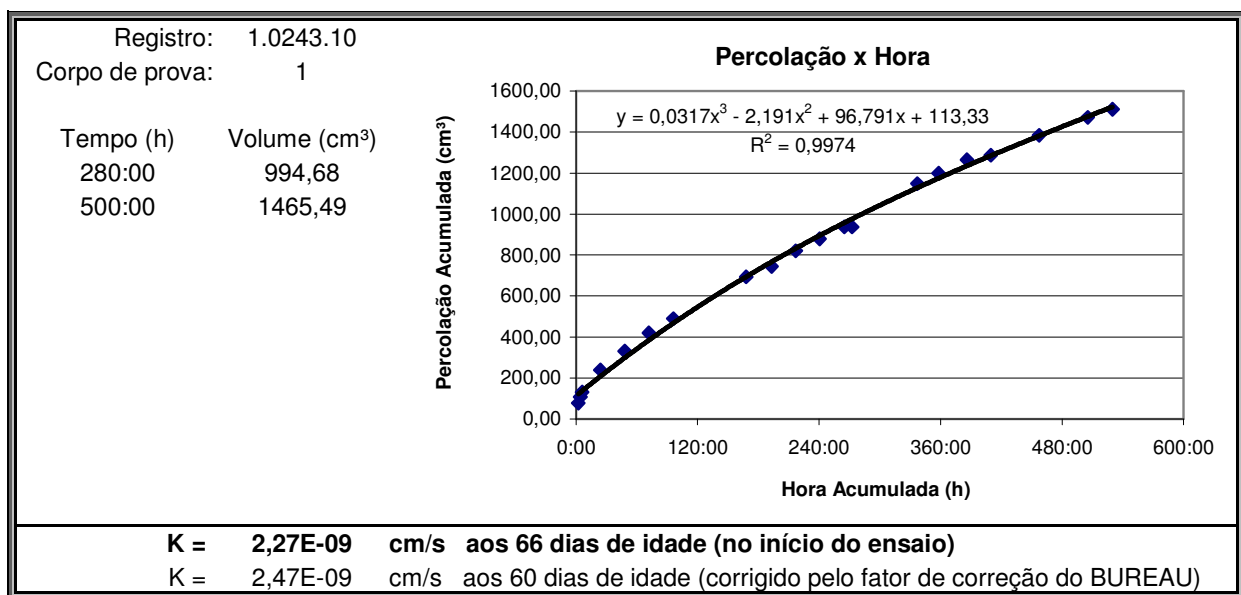
**Tabela 08 – Coeficiente de permeabilidade a água – Amostra: 1.0236.10**

**Tabela 09 – Coeficiente de permeabilidade a água – Amostra: 1.0237.10**


**Tabela 10 – Coeficiente de permeabilidade a água – Amostra: 1.0238.10**

**Tabela 11 – Coeficiente de permeabilidade a água – Amostra: 1.0239.10**


**Tabela 12 – Coeficiente de permeabilidade a água – Amostra: 1.0240.10**

**Tabela 13 – Coeficiente de permeabilidade a água – Amostra: 1.0241.10**


 <b>INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO</b>	<b>RELATÓRIO DE ENSAIOS</b>	DOCUMENTO Nº <b>RE LAME 035.2010-R0</b>
<b>LAME – LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS</b> Centro Politécnico da UFPR – Caixa Postal 19086 - CEP 81531-980 – Curitiba - PR Fone: +55 41 3361-6320 Fax: +55 41 3361-6141 jeferson.luiz@lactec.org.br	DATA DE EMISSÃO <b>07/04/2010</b>	PÁGINA <b>9 de 9</b>

**Tabela 14 – Coeficiente de permeabilidade a água – Amostra: 1.0243.10**



Betina Lepretti Medeiros  
Engenheira Civil  
Pesquisador  
Divisão de Tecnologia em Estruturas - DVTE

Plínio Hey Martins  
Engenheiro Civil - CREA 8.037-D/PR  
Gerente  
Divisão de Tecnologia em Estruturas - DVTE